TEXTE
92/2022

Abschlussbericht

Entwicklung von Rückbau- und Recyclingstandards für Rotorblätter

Kurztitel: Aufbereitung von Rotorblättern

von:

Dr. Christian Kühne, Prof. Dr.-Ing. Dieter Stapf,
M. Sc. Philipp Holz
Karlsruher Institut für Technologie (KIT), THINKTANK Industrielle Ressourcenstrategien, Institut für Technische Chemie (ITC), Institut für Angewandte Geowissenschaften (AGW), Karlsruhe

Dipl.-Ing. Werner Baumann, Dipl.-Ing. Sonja Mülhopt,
M. Sc. Manuela Wexler, Manuela Hauser, M. Sc. Jonas Kalkreuth, M. Sc. Jonathan Mahl,
M. Sc. Michael Zeller, M. Sc. Savina Yogish, Dr.-Ing. Hans-Joachim Gehrmann,
Prof. Dr.-Ing. Dieter Stapf
Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institut für Technische Chemie (ITC), Karlsruhe

Dr.-Ing. Rebekka Volk, M. Sc. Christoph Stallkamp,
M. Sc. Simon Steffl, Prof. Dr. rel. pol. Frank Schultmann

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Institut für Industriebetriebslehre und Industrielle Produktion (IIP), Karlsruhe

Dipl.-Chem. Rainer Schweppe, Dr.-Ing. Davide Pico,
Dipl.-Ing. Elisa Seiler, Dipl.-Ing. (FH) Jens Forberger,
M. Sc. Peter Brantsch
Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie (ICT), Pfinztal

Dr. Bastian Brenken

Composites United e. V., Stade

Prof. Dr. Martin Beckmann
Rechtsanwalt, Fachanwalt für Verwaltungsrecht, Münster

Herausgeber:
Umweltbundesamt

Für Mensch & Umwelt

Umwelt Bundesamt

TEXTE 92/2022

Ressortforschungsplan des Bundesministeriums für
Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit

Forschungskennzahl 3720 31 301 0
FB000898

Abschlussbericht

Entwicklung von Rückbau- und Recyclingstandards für Rotorblätter

Kurztitel: Aufbereitung von Rotorblättern

von

Dr. Christian Kühne, Prof. Dr.-Ing. Dieter Stapf,
M. Sc. Philipp Holz
Karlsruher Institut für Technologie (KIT), THINKTANK Industrielle Ressourcenstrategien, Institut für Technische Chemie (ITC), Institut für Angewandte Geowissenschaften (AGW), Karlsruhe

Dipl.-Ing. Werner Baumann, Dipl.-Ing. Sonja Mülhopt, M. Sc. Manuela Wexler, Manuela Hauser, M. Sc. Jonas Kalkreuth, M. Sc. Jonathan Mahl, M. Sc. Michael Zeller, M. Sc. Savina Yogish, Dr.-Ing. Hans-Joachim Gehrmann, Prof. Dr.-Ing. Dieter Stapf
Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institut für Technische Chemie (ITC), Karlsruhe

Dr.-Ing. Rebekka Volk, M. Sc. Christoph Stallkamp, M. Sc. Simon Steffl, Prof. Dr. rel. pol. Frank Schultmann
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Institut für Industriebetriebslehre und Industrielle Produktion (IIP), Karlsruhe

Dipl.-Chem. Rainer Schweppe, Dr.-Ing. Davide Pico, Dipl.-Ing. Elisa Seiler, Dipl.-Ing. (FH) Jens Forberger, M. Sc. Peter Brantsch
Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie (ICT), Pfinztal

Dr. Bastian Brenken
Composites United e. V., Stade

Prof. Dr. Martin Beckmann
Rechtsanwalt, Fachanwalt für Verwaltungsrecht, Münster

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Impressum

Herausgeber
Umweltbundesamt
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau
Tel: +49 340-2103-0
Fax: +49 340-2103-2285
buergerservice@uba.de
Internet: www.umweltbundesamt.de

/umweltbundesamt.de
/umweltbundesamt

Durchführung der Studie:
Karlsruher Institut für Techologie
Hermann-von-Helmholtz-Platz 1
76344 Eggenstein-Leopoldshafen

Abschlussdatum:
Juli 2022

Redaktion:
Fachgebiet III Fachstelle für den Rückbau und das Recycling von Windenergieanlagen
Dr. Petra Weißhaupt

Publikationen als pdf:
http://www.umweltbundesamt.de/publikationen

ISSN 1862-4804
Dessau-Roßlau, August 2022

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

Kurzbeschreibung: Entwicklung von Rückbau- und Recyclingstandards für Rotorblätter

Als Ergebnis der breiten politischen Befürwortung für die Energiewende und des stetig wachsenden Bestands an Windenergieanlagen (WEA) in Deutschland und Europa gewinnen Fragen der Wartung, Laufzeitverlängerung sowie des Anlagenrückbaus und Recyclings an Bedeutung. Eine besondere Herausforderung stellt dabei das Rotorblattrecycling mit ihren glasfaserverstärkten (GFK) und carbonfaserverstärkten (CFK) Anlagenteilen dar. Die für diese Materialien existierenden Recyclingprozesse haben sich noch nicht durchgesetzt und der Wiedereinsatz der recyclierten Materialien ist in der Breite nicht etabliert. Weiterhin mangelt es an Standards für die Demontage und werkstoffliche Aufbereitung dieser Materialien.

Zentraler Forschungsgegenstand war die Entwicklung von Standards für eine möglichst hochwertige und gleichzeitig wirtschaftlich zumutbare Aufbereitungs- und Behandlungsstrategie für Rotorblätter. Ausgehend von den zu erwartenden Abfallmengen und -arten und des speziellen Aufbaus und der Zusammensetzung der verschiedenen Rotorblätter wurde ein vollständiges und schlüssiges Konzept für deren Wartungen, Reparatur, Demontage, Vorzerkleinerung und Aufbereitung erarbeitet. Darauf basierend wurde die Organisationsverantwortung aus rechtlicher Sicht geprüft und mögliche erforderlicher, ergänzender materiell-rechtlicher Vorgaben vorgeschlagen. Auch Elemente der abfallwirtschaftlichen Produktverantwortung wurden auf Zweckmäßigkeit geprüft und bewertet.

Die Studie beschreibt damit ein erstes umfassendes technisches, rechtliches und organisatorisches Recyclingkonzept für Rotorblätter.

Abstract: Development of deconstruction and recycling standards for rotor blades

As a result of the broad political support for the energy turnaround and the continued growing stock of wind turbines (WTG) in Germany and Europe, questions of maintenance, lifetime extension as well as turbine dismantling and recycling are gaining in importance. Rotor blade recycling with its glass fiber reinforced (GFRP) and carbon fiber reinforced (CFRP) turbine components poses a particular challenge. The existing recycling processes for these materials have not yet become established, and the reuse of recycled materials is not widespread. Furthermore, there is a lack of standards for the dismantling and material reprocessing of these materials.

The main object of research was the development of standards for a reprocessing and treatment strategy for rotor blades that is as high-quality as possible and at the same time economically reasonable. Based on the expected waste quantities and types and the special structure and composition of the various rotor blades, a complete and coherent concept for their maintenance, repair, dismantling, pre-shredding and reprocessing was developed. Based on this, the organizational responsibility was examined from a legal point of view and possible necessary supplementary material-legal specifications were proposed. Elements of waste management product responsibility were also examined and evaluated for expediency.

The study thus describes a first comprehensive technical, legal and organizational recycling concept for rotor blades.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis ... 18
Tabellenverzeichnis ... 27
Abkürzungsverzeichnis ... 31
Zusammenfassung ... 36
Summary ... 49
1 Hintergrund und Zielsetzung des Forschungsvorhabens ... 61
1.1 Hintergrund ... 61
1.2 Zielsetzung ... 62
2 Rotorblattkonstruktion und erwartete Abfallmengen ... 63
2.1 Ziel und Vorgehen ... 63
2.2 Vorgehen und Ergebnisse zur Erhebung der Rotorblattkonstruktionen ... 64
2.2.1 Aufbau von Rotorblättern ... 65
2.2.1.1 Stand der Technik ... 65
2.2.1.2 Neue Entwicklungen im Bereich der Rotorblätter ... 66
2.2.1.3 Technologie der segmentierten Rotorblätter ... 68
2.2.1.4 Wurzelring und Verbindungselemente zur Nabe ... 69
2.2.1.5 Zusätzliche Elemente in einem Rotorblatt ... 71
2.2.2 Fertigungsverfahren ... 73
2.2.2.1 Vakuuminfusionsverfahren (VARTM = Vacuum Assisted Resin Transfer Molding) ... 74
2.2.2.2 Prepreg-Prozess ... 75
2.2.2.3 Handlaminierung “Hand lay-up” / “wet lay-up” ... 76
2.2.2.4 Sonderverfahren: Vakuuminfusionsverfahren VARTM – Integral-Blade von Siemens ... 76
2.2.3 Materialien ... 77
2.2.3.1 Kunststoffharze ... 78
2.2.3.2 Verstärkungsfasern ... 79
2.2.3.3 Sandwichmaterialien ... 80
2.2.3.4 Coating / Beschichtung ... 81
2.2.3.5 Zusammensetzungen von Rotorblättern (einzelne Beispiele aus der Literatur oder Produktdatenblättern) ... 83
2.2.4 Schäden an Rotorblättern und Lösungsansätze ... 88
2.2.4.1 Strukturschäden ... 88
2.2.5 Ursachen für Schäden an Rotorblättern ... 88

2.2.5.1 Herstellungsbedingte Fehler ... 88
2.2.5.2 Externe Ursachen von Schäden ... 89
2.2.5.3 Blitzschlag ... 90
2.2.5.4 Niederschlag ... 93
2.2.5.5 Vereisung ... 94
2.2.5.6 Eindringen von Wasser ... 95
2.2.5.7 Schäden durch Ermüdung ... 96
2.2.5.8 Schäden durch Feuer ... 97
2.2.6 Monitoring ... 97
2.2.6.1 Ultraschall Echo Verfahren ... 98
2.2.6.2 Akustische Detektion ... 99
2.2.6.3 Inspektion von Rotorblättern mit Wärmefluss-Thermographie ... 99
2.2.6.4 Unbemannte Inspektion von Rotorblättern ... 100
2.2.6.5 Modalbasierte Ansätze ... 101
2.2.6.6 Optische Kunststoff-Fasern ... 102
2.2.6.7 Vermeidung von Schäden durch Ermüdungsbelastung ... 102
2.2.6.8 Verhinderung von Rotorunwuchten ... 102
2.2.7 Reparaturmaßnahmen ... 102
2.2.7.1 Reparaturen an der Vorderkante ... 104
2.2.7.2 Oberflächen- und Delaminierungsrisse: Injektionsreparatur ... 105
2.2.7.3 Strukturreparaturen, Patches und Scarfs (Flicken-Reparatur) ... 106
2.2.8 Prüfung von Rotorblättern ... 107
2.3 Vorgehen und Ergebnisse zur Erhebung des WEA-Bestandes ... 108
2.3.1 Eignung des Marktstammdatenregisters (MaStR) für die Abschätzung des WEA-Bestands ... 108
2.3.2 Analyse der vorhandenen WEA-Daten des Marktstammdatenregisters ... 110
2.3.2.1 Datenlücken ... 110
2.3.2.2 Schließung von Datenlücken ... 111
2.3.2.3 Marktanteile des WEA-Bestandes ... 112
2.3.2.4 Nabenhöhen und Rotorblattdurchmesser des WEA-Bestandes ... 115
2.3.2.5 Alter des WEA-Bestandes ... 119
2.3.3 Analyse des Altrotorblattaufkommens ... 120
2.4 Ergebnisse zur Abschätzung des Abfallaufkommens ... 122
2.4.1 Optionen zur Abschätzung des Materialaufkommens ... 122

2.4.1.1 Option A: Kontakt und Befragung der Hersteller, Reparateure, Aufbereiter und Entsorger ... 122
2.4.1.2 Option B: Clusterbildung ... 122
2.4.1.3 Option C: Regressionsmodelle ... 123
2.4.2 Abschätzung des Abfallaufkommens nach Option C (Rechnung 1: Literaturansatz) ... 123
2.4.2.1 Datengrundlage ... 124
2.4.2.2 Berechnung der Materialmengen nach den Materialklassen GFK und GFK/CFK ... 125
2.4.2.3 Berechnung der Materialmengen von GFK und CFK ... 128
2.4.2.4 Gegenüberstellung zur Literatur ... 130
2.4.3 Abschätzung des Abfallaufkommens nach Option C (Rechnung 2: Eigenes Regressionsmodell auf erweiterter Datenbasis) ... 132
2.4.3.1 Datengrundlage ... 132
2.4.3.2 Berechnung der Materialmengen nach den Materialklassen GFK und GFK/CFK ... 134
2.4.3.3 Berechnung der Materialmengen von GFK und CFK ... 138
2.4.3.4 Gegenüberstellung zur Literatur ... 139
2.4.4 Abschätzung des Abfallaufkommens nach Option C (Rechnung 3: Erhöhung des CFK-Anteils in GFK/CFK Rotorblättern) ... 141
2.4.4.1 Datengrundlage ... 141
2.4.4.2 Berechnung der Materialmengen in den Materialklassen GFK/CFK ... 142
2.4.4.3 Gegenüberstellung der Literatur ... 142
2.4.5 Erwartete regionale Verteilung des kumulierten Rotorblattaufkommens bis 2040 in Deutschland ... 143
2.4.6 Zusammenfassung ... 144
2.5 Kritische Würdigung der Aufkommensabschätzung ... 147
2.5.1 Unsicherheiten ... 148
2.5.2 Granularität der Materialzusammensetzung ... 148
2.5.3 Datenlücken im MaStR ... 148
2.5.4 Second-use-Markt von Rotorblättern ... 150
2.5.5 Lebensdauern von WEA und Rotorblättern ... 150
3 Risikobeurteilung der beim Rückbau und der Verwertung von Rotorblättern freiwerdenden Stäube und Fasern anhand von Gefährlichkeit und Exposition ... 154
3.1 Einleitung ... 154
3.2 Methodisches Vorgehen ... 154
3.3 Definition relevanter Begriffe ... 156
3.3.1 Definition Faser, Partikel und Faserstaub ... 156

3.3.2 Definitionen für Inhalierbarkeit und Eindringtiefen in die Lunge 157
3.3.3 Definitionen Karzinogenität und damit verbundene Einordnungen 160
3.3.4 Definitionen Risiko und Risikobewertung 162
3.3.5 Schutzkonzepte 164
3.3.6 Risikoeinschätzung anhand einer Matrix 166
3.4 Materialauswahl und -gruppierung 167
3.5 Ergebnisse 168
3.5.1 Eigenschaften von Fasern 168
3.5.1.1 Carbonfasern 169
3.5.2 Stand der Richtlinien für Fasern an Arbeitsplätzen 171
3.5.3 Biologische Wirkung von Fasern 176
3.5.3.1 Carbonfasern 179
3.5.3.2 Glasfasern 184
3.5.4 Risikovergleich anhand der Matrix 188
3.5.5 Ökotoxikologische Betrachtung der Materialien 189
3.5.5.1 Testmethoden zur ökotoxikologischen Beurteilung von akuter und chronischer Toxizität in aquatischen Systemen 191
3.5.5.2 Testmethoden zur ökotoxikologischen Beurteilung von akuter und chronischer Toxizität in terrestrischen Systemen 193
3.5.6 Stand der Kenntnisse bei Carbonfasern 194
3.5.7 Ökotoxizität von Glasfasern 194
3.5.8 Ökotoxizität der Matrixmaterialien Polyester, Polyurethan und Epoxidharze 195
3.5.8.1 Polyurethane 195
3.5.9 Zusammenfassung zu den ökotoxikologischen Informationen 196
3.6 Beurteilung der Rückbauprozesse 197
3.6.1 Vorhandene Arbeitsplatzmessungen: MEGA-Daten 200
3.6.2 Vorhandene Arbeitsplatzmessungen: CarboBreak-Daten; die mechanische Bearbeitung von CFK mittels Sägeprozess 202
3.6.3 Theoretische Abschätzung für Trennung von CFK/GFK 203
3.7 Zusammenfassung 207
4 Baustellenseitige Abfallbehandlung 209
4.1 Einleitung 209
4.1.1 Methodisches Vorgehen 209
4.1.2 Auswahl der technologischen und wirtschaftlichen Kriterien 210
4.1.3 Skala für die Auswertung der einzelnen Kriterien 211

4.1.3.1 Partikelemissionen in die Luft ... 211
4.1.3.2 Befahrung/Bodenverdichtung ... 211
4.1.3.3 Prozesswasser ... 212
4.1.3.4 Sicherheit ... 212
4.1.3.5 Lärm/Schall ... 213
4.1.3.6 Demontageziel ... 213
4.1.3.7 Sortenreinheit/Qualität ... 213
4.1.3.8 Verfahrensreife/Praxistauglichkeit ... 214
4.1.3.9 Energiebedarf ... 214
4.1.3.10 Wirtschaftlichkeit ... 214
4.2 Demontage der Rotorblätter ... 214
4.3 Technologien zum Zerlegen von Rotorblättern auf der Baustelle ... 215
4.3.1 Wasserstrahlschneiden ... 215
4.3.2 Seilsäge ... 218
4.3.3 Mobile Sägen ... 221
4.3.4 Hydraulische Scheren ... 223
4.3.5 Unbemannte Demontagekammer ... 223
4.3.6 Alternative Demontageverfahren ... 223
4.3.6.1 Laserstrahlschneiden ... 223
4.3.6.2 Energetische Demontage ... 224
4.4 Bewertung der Demontagetechnologien ... 227
4.4.1 Wasserstrahlschneiden ... 227
4.4.2 Seilsäge ... 228
4.4.3 Mobile Sägen ... 229
4.4.4 Unbemannte Demontagekammer ... 229
4.5 Partikel-Emission ... 230
4.6 Zusammenfassung ... 231
5 Aufbereitung von Rotorblattabfällen ... 233
5.1 Bewertungskriterien ... 234
5.1.1 Technology Readiness Level (TRL) ... 234
5.1.2 Durchsatz ... 235
5.1.3 Spezifischer Energiebedarf ... 235
5.1.4 Verschleiß ... 235
5.1.5 Aufbereitungsverfahren ... 235

5.1.6 Produktkriterien und Störstoffanteile ... 235
5.1.7 Wirtschaftlichkeit ... 236
5.1.8 Aufbereitungsziele ... 236
5.2 Beschreibung der Aufbereitungstechnik ... 237
5.2.1 Grundlagen der Zerkleinerungstechnik von Feststoffen ... 237
5.2.2 Zerkleinerungsapparate für FVW ... 239
5.2.2.1 Backenbrecher ... 240
5.2.2.2 Ein- / Mehrwellenzerkleinerer ... 240
5.2.2.3 Prallbrecher und Hammerbrecher ... 241
5.2.2.4 Querstromzerspaner ... 241
5.2.2.5 Prallmühle und Hammermühle ... 242
5.2.2.6 Schneidmühle ... 242
5.2.2.7 Kugelmühle ... 242
5.2.3 Durchsatz und Leistung der Zerkleinerungsapparate für FVW ... 242
5.2.4 Klassier- und Sortierverfahren für Rotorblattmaterialien ... 245
5.3 Zuschnittstufen, Metall-, CFK-, und Sandwichmaterial-Abtrennung der segmentierten Rotorblätter ... 247
5.3.1 Zuschnitte in 1m Rotorblatt-Abschnitte ... 247
5.3.2 Entfrachtung von Metallen, Elektro- und Elektronikkomponenten ... 248
5.3.3 Konzept CFK/GFK Trennung ... 250
5.3.4 Trennung von GFK, Balsaholz und Schaum ... 252
5.4 Beschreibung der verwertungsspezifischen Aufbereitung ... 253
5.4.1 Aufbereitung von Rotorblattabfällen für die Verwertung von GFK-Abfällen in Zementwerken ... 253
5.4.2 Aufbereitung für die Pyrolyse ... 254
5.4.3 Mechanische Verwertung von FVW als Ersatzfüllstoff ... 255
5.5 Bewertung der Aufbereitungsprozesse für Rotorblattabfälle ... 255
5.5.1 Technology Readiness Level (TRL) ... 255
5.5.2 Energiebedarf ... 257
5.5.3 Verschleiß ... 258
5.5.4 Aufbereitungsverfahren ... 260
5.5.5 Wirtschaftlichkeit ... 260
5.5.6 Aufbereitungsziele ... 261
5.6 Resümee und Handlungsempfehlungen ... 262
6 Verwertung aufbereiteter Rotorblattabfälle ... 265

6.1 Bewertungskriterien zur Prozessbeurteilung 266
6.1.1 Technische Beurteilung der Verwertungsprozesse 266
6.1.2 Rahmenbedingungen zur Abfallaufbereitung und zur Risikobeurteilung 271
6.1.3 Technische Beurteilung von Prozessketten und Verwertungskapazitäten 272
6.2 Technische Beschreibung von Verwertungsprozessen 274
6.2.1 Verwertung von Faserverbundwerkstoffen 274
6.2.1.1 Mechanische Zerkleinerung (Partikelrecycling) 276
6.2.1.2 Fragmentierung mittels Hochspannungsentladung 277
6.2.1.3 Löseverfahren 280
6.2.1.4 Pyrolyse 280
6.2.1.5 Mikrowellen-Pyrolyse 281
6.2.1.6 Wirbelschichtverfahren 283
6.2.1.7 Solvolyse 289
6.3 Verwertung von glasfaserverstärkten Kunststoffen (GFK) 290
6.3.1 Prozesse zum Recycling von GFK 291
6.3.1.1 Mechanische Verwertung von GFK 292
6.3.1.2 GFK-Auftrennung mittels Hochspannungs-Fragmentierung 296
6.3.1.3 GKF-Verwertung im Wirbelschichtreaktor 299
6.3.1.4 GFK-Recycling mittels Mikrowellenpyrolyse 301
6.3.1.5 GFK-Recycling mittels Solvolyse 301
6.3.1.6 Zusammenfassung und Beurteilung der Prozesse zum Recycling von GFK 302
6.3.2 Prozesse zur Nutzung der Glasfaser als Rohstoff 303
6.3.2.1 Metallurgische Prozesse 303
6.3.2.2 Einsatz bei der Zementklinker-Herstellung 304
6.3.2.3 Zusammenfassung und Beurteilung der Prozesse zur Nutzung der Glasfaser als Rohstoff 309
6.3.3 Prozesse der sonstigen GFK-Verwertung 310
6.3.3.1 Energetische Verwertung 310
6.3.4 Prozesse der Beseitigung 310
6.4 Verwertung von carbonfaserverstärkten Kunststoffen (CFK) 310
6.4.1 Prozesse zum Recycling von CFK 312
6.4.1.1 Prozesse zur mechanischen Zerkleinerung von CFK 312
6.4.1.2 Trennung des Materialverbundes mittels HF-Fragmentierung 314
6.4.1.3 Recycling mittels Pyrolyse 317

6.4.1.4 Recycling im Wirbelschichtreaktor ... 324
6.4.1.5 Recycling mittels thermokatalytischer Entgasung ... 326
6.4.1.6 Recycling mittels Solvolyse ... 327
6.4.1.7 Zusammenfassung und Beurteilung der Prozesse zum Recycling von CFK ... 328
6.4.2 Prozesse zur Nutzung der Carbonfaser als Rohstoff ... 330
6.4.2.1 Einsatz in metallurgischen Prozessen ... 330
6.4.2.2 Einsatz bei der Herstellung von Calciumcarbid ... 331
6.4.2.3 Zusammenfassung und Beurteilung der Prozesse zur Nutzung der Carbonfaser als Rohstoff ... 333
6.4.3 Prozesse der sonstigen Verwertung von Carbonfasern ... 334
6.4.3.1 Energetische Verwertung ... 334
6.4.4 Prozesse der Beseitigung ... 335
6.5 Verwertung von Metallen ... 336
6.5.1 Stahl ... 336
6.5.1.1 Stahlrecycling im Elektrolichtbogenofen ... 338
6.5.1.2 Einfluss von Verunreinigungen auf die Qualität des Recyclingstahls ... 340
6.5.2 Aluminium ... 341
6.5.2.1 Recycling von Aluminium in Schmelzprozessen ... 342
6.5.2.2 Einfluss von Verunreinigungen auf die Rezyklatqualität ... 345
6.5.2.3 Anforderungen an das Einsatzmaterial ... 346
6.5.3 Kupfer ... 349
6.5.3.1 Recycling von Kupfer ... 350
6.5.3.2 Einfluss von Verunreinigungen auf die Rezyklatqualität ... 356
6.5.3.3 Anforderungen an das Einsatzmaterial ... 356
6.6 Verwertung von Balsaholz ... 358
6.7 Verwertung von in Rotorblättern verbauten Schäumen ... 360
6.7.1 Überblick und Recyclingverfahren für Polyurethan–Schäume ... 361
6.8 Lacke und Beschichtungen ... 364
6.9 Bewertung zur Verwertung faserförmiger Abfälle ... 366
6.9.1 TRL-Bewertung von Prozessen der Verwertung ... 366
6.9.2 Bewertung des Energiebedarfs von Verwertungsprozessen ... 367
6.9.3 Bewertung von Produkten des Recyclings ... 369
6.9.3.1 Bewertung der Produkte des GFK-Recyclings ... 369
6.9.3.2 Bewertung der Produkte des CFK-Recyclings ... 370

6.9.4 Bewertung kommerziell verfügbarer Prozessketten 375
6.9.5 Technoökonomische Bewertung von Prozessketten für Rotorblattrecycling 376
6.9.5.1 Bewertungsansätze in der Literatur 376
6.9.5.2 Berechnung der Recyclingkosten 379
6.9.5.3 Berechnung des Rezyklatwertes 380
6.9.5.4 Technoökonomischer Vergleich relevanter Prozessrouten 381
6.9.6 Zusammenfassung zur Verwertung von Faserverbundwerkstoffen 385
6.10 Zusammenfassung zur Verwertung aufbereiteter Rotorblattabfälle 386
7 Organisationsverantwortung 390
7.1 Überblick 390
7.2 Pflichten zur Entsorgung von Rotorblättern 392
7.2.1 Beginn und Dauer der Entsorgungspflicht nach Stilllegung der WEA 393
7.2.1.1 Beginn der Entsorgungspflicht 393
7.2.1.2 Ende der Abfalleigenschaft 400
7.2.2 Pflichten zur Vermeidung von Rotorblattabfällen 404
7.3 Entsorgungsverantwortung 409
7.3.1 Entsorgungspflicht der Betreiber von WEA 410
7.3.1.1 Genehmigungspflichten 411
7.3.1.2 Rückbaupflichten 412
7.3.1.3 Pflicht zur ordnungsgemäßen und schadlosen Verwertung der Rotorblätter 416
7.3.1.4 Sicherheitsleistung 417
7.3.2 Entsorgungspflicht von Abfallerzeugern und Abfallbesitzern 423
7.3.2.1 Hersteller und Vertreiber von WEA 426
7.3.2.2 Beauftragte Unternehmen 427
7.3.3 Verhaltens- und Zustandsverantwortung nach BBodSchG 428
7.4 Genehmigungspflichtigkeit des Rückbaus 429
7.4.1 Immissionsschutzrechtliche Genehmigung der Abfallbehandlung 429
7.4.2 Baugenehmigungspflicht des Rückbaus 430
7.4.3 Genehmigung eines Eingriffs in Natur und Landschaft 430
7.4.4 Waldumwandlungsgenehmigung 431
7.4.5 Wasserrechtlich genehmigungsbedürftige Benutzungstatbestände 431
7.4.6 Zwischenergebnis 432
7.5 Materiell-rechtliche Anforderungen an die Entsorgung von Rotorblättern 432
7.5.1 Grundpflichten der Kreislaufwirtschaft (§ 7 KrWG) 433

7.5.1.1 Ordnungsgemäßheit der Entsorgung 433
7.5.1.2 Schadlosigkeit der Entsorgung 441
7.5.1.3 Technische Möglichkeit der Entsorgung 442
7.5.1.4 Wirtschaftliche Zumutbarkeit der Entsorgung 443
7.5.2 Rangfolge und Hochwertigkeit der Verwertung (§ 8 KrWG) 443
7.5.2.1 Bestmöglicher Umweltschutz bei der Zerlegung der Rotorblätter 446
7.5.2.2 Bestmöglicher Umweltschutz bei der Aufbereitung der Rotorblätter 447
7.5.2.3 Bestmöglicher Umweltschutz und Hochwertigkeit der Verwertungs Recyclings 448
7.5.2.4 Zwischenfazit 449
7.5.3 Getrenntsammlung 450
7.5.4 Vermischungsverbot 451
7.6 Behördliche Überwachung der Entsorgung von Rotorblättern 452
7.7 Normkonkretisierung und -ergänzung 453
7.7.1 Materiell-rechtliche Ergänzungen/Konkretisierungen 453
7.7.2 Grenzwert für die Freisetzung von Fasern 454
7.7.3 Vorgaben für mehrstufige Demontage-, Aufbereitungs- und Verwertungsverfahren 455
7.7.4 Verfahrensrechtliche Ergänzungen 456
7.7.4.1 Ergänzende Zertifizierung von Entsorgungsfachbetrieben 456
7.7.4.2 Neue Abfallschlüssel? 458
7.7.4.3 Erweiterung der Nachweispflichten 459
7.7.4.4 Vorgaben zur Berechnung der Sicherheitsleistung 460
7.7.5 Rechtsänderung oder untergesetzliche Normkonkretisierung 460
7.8 Instrumente der Produktverantwortung 463
7.8.1 Einführung 463
7.8.1.1 Produktverantwortung für WEA oder für Einzelkomponenten 464
7.8.1.2 Umfang der Produktverantwortung 465
7.8.1.3 Schnittstellen zur Betreiberverantwortung 466
7.8.1.4 Stoffstrom- oder produktbezogene Produktverantwortung 468
7.8.1.5 Grenzen der Produktverantwortung 468
7.8.1.6 Besondere Produkteigenschaften der Rotorblätter 468
7.8.2 Beschränkungen und Verbote des Inverkehrbringens von Rotorblättern 469
7.8.2.1 Produktdesign 470
7.8.2.2 Gewährleistung umweltverträglicher Entsorgung 471
7.8.3 Kennzeichnungs- und Hinweispflichten 471

7.8.3.1 Erforderlichkeit einer Kennzeichnung ... 472
7.8.3.2 Genehmigungsrechtliche Informationsmöglichkeiten ... 475
7.8.3.3 Informationen aus dem Marktstammdatenregister ... 476
7.8.3.4 Chemikalienrechtliche Informationspflichten ... 478
7.8.3.5 Kennzeichnungspflichten im Bauproduktenrecht ... 478
7.8.3.6 Betriebs- und Geschäftsgeheimnisse ... 479
7.8.4 Obhutspflicht ... 483
7.8.5 Verpflichtung zur Rücknahme und Rückgabe von Rotorblättern ... 484
7.8.5.1 Rücknahmepflicht ... 486
7.8.5.2 Rückgabepflicht ... 496
7.8.5.3 Ergänzende Regelung zur Kostentragungspflicht ... 496
7.8.6 Zwischenergebnis zur Rücknahme- und Rückgabepflicht ... 497
7.9 Zusammenfassende rechtliche Empfehlungen zur Organisationsverantwortung ... 498
7.9.1 Verbesserung der Informationslage für entsorgungspflichtige Anlagenbetreiber ... 498
7.9.2 Konkretisierung materiell-rechtlicher Vorgaben für die Verwertung ... 500
7.9.3 Hochwertigkeit der Rotorblattentsorgung ... 500
7.9.4 Empfehlungen zur Entsorgungsüberwachung ... 500
7.9.5 Einführung von Rücknahme- und Rückgabepflichten ... 501
7.9.6 Mögliche Gegenstände einer Vollzugshilfe ... 502
7.9.7 Anforderungen an das Produktdesign ... 503
8 Zusammenfassung ... 504
8.1 Rotorblattkonstruktion und erwartete Abfallmengen ... 504
8.2 Risikobewertung der beim Rückbau und der Verwertung von Rotorblättern freiwerdenden Stäube und Fasern anhand von Gefährlichkeit und Exposition ... 505
8.3 Baustellenseitige Abfallbehandlung, Aufbereitung und Verwertung von Rotorblattabfällen ... 507
8.4 Organisationsverantwortung ... 509
8.4.1 Verbesserung der Informationslage für entsorgungspflichtige Anlagenbetreiber ... 510
8.4.2 Konkretisierung materiell-rechtlicher Vorgaben für die Verwertung ... 511
8.4.3 Hochwertigkeit der Rotorblattentsorgung ... 511
8.4.4 Empfehlungen zur Entsorgungsüberwachung ... 512
8.4.5 Einführung von Rücknahme- und Rückgabepflichten ... 512
8.4.6 Mögliche Gegenstände einer Vollzugshilfe ... 513
8.4.7 Anforderungen an das Produktdesign ... 514
9 Literaturverzeichnis ... 515

Anhang 552
A.1 Anhang Kapitel 2 552
A.1.1 Methodik 552
A.1.2 Interviewleitfaden (lang) 554
A.1.3 Interviewleitfaden (Kurz) 555
A.1.4 Übersicht der kontaktierten Unternehmen 556
A.2 Anhang Kapitel 4 558
A.3 Anhang Kapitel 5 561
A.4 Anhang Kapitel 6 564
A.4.1 Primärrouten der Metallherstellung 564
A.4.2 Vergleich der Massen- und Energieflüsse zwischen Primär- und Sekundärrouten der Metallherstellung 568
A.4.3 Umgang mit prozessspezifischen Reststoffen beim Metallrecycling 574
A.4.4 Eco-Audit-Modell Rotorblatt Recycling 581

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Vorgehensweise in der Abfallaufkommensabschätzung. 64
Abbildung 2: Schematischer Aufbau eines Rotorblatts. 65
Abbildung 3: Holmkasten A) und Holmsteg B) im Querschnitt. 66
Abbildung 4: Querschnitt eines Rotorblatts mit zwei Homstegen. 67
Abbildung 5: Querschnitt eines Rotorblatts mit drei Holmstegen. 67
Abbildung 6: Verteilungen der Holmstege in einem Rotorblatt. 67
Abbildung 7: Patentiertes Tragflächenprofil von Vestas. 68
Abbildung 8: Rotorblattverbindung für eine WEA. 68
Abbildung 9: Segmentiertes Rotorblatt (patentiertes System der Fa. Vestas Wind Systems A/S). 69
Abbildung 10: Verbindungsanordnung für ein Rotorblatt mit angeflanschten Segmenten. 69
Abbildung 11: Querbolzenanschluss („IKEA“ - Anschluss). 70
Abbildung 12: Eingeklebter Leichtbauflansch. 70
Abbildung 13: Einlaminierte Hülsen. 71
Abbildung 14: Blitzschutzmethoden für Rotorblätter. IEC 1864/02. 72
Abbildung 15: Gezackte Hinterkante (Serrated Trailing Edge). 72
Abbildung 16: „Serrated Trailing Edge“ im Detail. 73
Abbildung 17: „Serrated Trailing Edge“ im Detail. 73
Abbildung 18: Extender des Rotorblatts an der Wurzel und an der Spitze (EnergieKontor). 73
Abbildung 19: Fertigung des Rotorblatts mit Holmgurten. 74
Abbildung 20: Fertigung des Rotorblatts mit einem Kastenholm. 74
Abbildung 21: Vakuuminfusionsverfahren. 75
Abbildung 22: Prepreg-Verfahren. 75
Abbildung 23: Handlaminierung (Wet Lay-up Verfahren). 76
Abbildung 24: Vakuuminfusionsverfahren VARTM – Integral-Blade von Siemens. 77
Abbildung 25: Rotorblattstück in der Mehrfachsandwichbauweise (links) und in Einfachbauweise (rechts) aus Balsaholz (*Ochroma Lagopus*). 80
Abbildung 26: Schematischer Aufbau eines Rotorblatts mit eingesetzten Materialien. 83
Abbildung 27: Enercon E-66 Wind Turbine Gewichtsverteilung [%]. 84
Abbildung 28: Rotorblatt Siemens B75 - 40 m. 87
Abbildung 29: Rotorblatt 40 m. 87
Abbildung 30: Schematische Darstellung des Schädigungsverhaltens einer Probe unter Druckbelastung. 89
Abbildung 31: Schematische Darstellung des „Zonen Konzepts“. 91
Abbildung 32: Blitzschutzsystem eines Rotorblatts. 92
Abbildung 33: Darstellung eines patentierten Heißluftenteisungs-Systems der Firma VESTAS. 95
Abbildung 34: Darstellung eines patentierten elektromagnetischen Mikrowellenenergie De-Icing Systems. 95
Abbildung 35: Verschiedene Arten von Rotorblattschäden. 98
Abbildung 36: Winch Operated Robot der Firma Aerones. 101
Abbildung 37: Schadenszonen an geschädigten Rotorblättern. 103

Abbildung 38: Bereiche mit Lackabplatzungen, Kratzern und Oberflächenschäden (Fraunhofer ICT, Pfinztal). 104
Abbildung 39: Bereiche mit beschädigter Erosionsschutzfolie (Fraunhofer ICT, Pfinztal). 105
Abbildung 40: Verschraubungs-Reparatur („bolted doublers“). 106
Abbildung 41: Band Reparatur (engl. Scarf). 106
Abbildung 42: Hersteller (ohne Übernahmen) der in 2020 in Deutschland in Betrieb befindlichen WEA [Anzahl; Anteil]. 113
Abbildung 43: Hersteller (inkl. Übernahmen) der in 2020 in Deutschland in Betrieb befindlichen WEA [Anzahl; Anteil]. 114
Abbildung 44: WEA des MaStR nach Hersteller und Altersklassen (ab 15 Jahren) (Stand: Juli 2020). 114
Abbildung 45: Beispielhafte Auswertung der WEA-Typen von Enercon nach Alter und Häufigkeit. 115
Abbildung 46: Datenqualität im MaStR (ohne Datenaufbereitung und –ergänzung) zur Eigenschaft Nabenhöhe (oben) und Rotordurchmesser (unten) der WEA in Betrieb in Deutschland (Stand: Juli 2020). 116
Abbildung 47: Häufigkeitsverteilung der Rotordurchmesser der WEA in Betrieb in Deutschland. 117
Abbildung 48: Zusammenhang von Angaben im MaStR der Eigenschaften Rotordurchmesser und Alter der WEA in Jahren, hier am Beispiel von Enercon-WEA. 118
Abbildung 49: Entwicklung des durchschnittlichen Rotordurchmessers und der Nennleistung (basierend auf MaStR). 118
Abbildung 50: Prozentuale Altersverteilung der WEA in Betrieb in Deutschland [Anzahl] [Prozent] (Stand: Juli 2020). 119
Abbildung 51: Häufigkeit und kumulative Altersverteilung [in Jahren] der WEA in Betrieb in Deutschland (Stand: Juli 2020). 120
Abbildung 52: Zeitliche Angebots- und Nachfrageanalyse von gebrauchten bzw. neuwertigen Rotorblättern des Typs LM 13.4 passend für WEA-Typ Neg Micon M530 (oben links), des Typs N100 passend für WEA-Typ Nordex N100/2500 (oben rechts), des Typs LM 14.2 passend für Bonus B33/300 (unten links) sowie des Typs Enercon E-40/3 (unten rechts) (Stand: 04.12.2020). 121
Abbildung 53: Datenvollständigkeit des ergänzten MaStR Datensatzes hinsichtlich der beiden Eigenschaften Rotorblattmaterial und Rotorblattlänge, der der nachfolgenden Regression zugrunde liegt. 124
Abbildung 54: Anteile der Rotorblattmaterialien je WEA auf Basis der MaStR-Daten und der Hauptmaterialien der Rotorblätter (Rechnung 1). 125
Abbildung 55: Abfallprognose der Verbundwerkstoffe aus der GFK Materialklasse; kumulierte Abfallmenge: 392.124 t (Rechnung 1, Materialklasse). 126
Abbildung 56: Abfallprognose der Verbundwerkstoffe aus der GFK/CFK Materialklasse; kumulierte Abfallmenge: 76.927 t (Rechnung 1, Materialklasse). 126
Abbildung 57: Abfallprognose der Verbundwerkstoffe aus der GFK Materialklasse; kumulierte Abfallmenge: 429.525 t. (Rechnung 1, Material- und Leistungsklassen). 127

Abbildung 58: Abfallprognose der Verbundwerkstoffe aus der GFK/CFK Materialklasse; kumulierte Abfallmenge: 170.872 t (Rechnung 1, Material- und Leistungsklasse). 128
Abbildung 59: Abfallprognose für GFK-Verbundwerkstoffe; kumulierte Abfallmenge: 589.581 t (Rechnung 1, Material- und Leistungsklasse).....129
Abbildung 60: Abfallprognose für CFK-Verbundwerkstoffe; kumulierte Abfallmenge: 10.816 t (Rechnung 1, Material- und Leistungsklasse).....129
Abbildung 61: Vergleich Abfallprognose aktuelle Studie und Vorgängerstudie von Zotz et al. 2019; kumulierte GFK-Abfallmenge: (Rechnung 1, GFK, Material- und Leistungsklassen).....130
Abbildung 62: Vergleich Abfallprognosen aktuelle Studie und Vorgängerstudie von Zotz et al. 2019; kumulierte GFK Abfallmenge: (Rechnung 1, GFK aus GFK und GFK/CFK, Material- und Leistungsklassen).....131
Abbildung 63: Anteile der Rotorblattmaterialien an den MaStR-Daten und der Hauptmaterialien der Rotorblätter (Rechnung 2). 132
Abbildung 64: Berechnetes Gesamtgewicht je Rotorblatt in Abhängigkeit der Rotorblattlänge nach Formel (1).....133
Abbildung 65: Berechnetes Gesamtgewicht je Rotorblatt in Abhängigkeit der Rotorblattlänge nach Formel (2).....133
Abbildung 66: Vergleich der betrachteten Regressionsfunktionen des Rotorblattgewichts in Abhängigkeit der Rotorblattlänge in dieser Studie mit Werten aus der Literatur ((Sommer et al. 2020); (Pehlken et al. 2017); (Andersen et al. 2016) basierend auf (Caduff et al. 2012). 134
Abbildung 67: Abfallprognose der Verbundwerkstoffe aus der GFK Materialklasse; kumulierte Abfallmenge: 325.726 t (Rechnung 2, Materialklasse). 135
Abbildung 68: Abfallprognose der Verbundwerkstoffe aus der GFK/CFK Materialklasse; kumulierte Abfallmenge: 143.832 t (Rechnung 2, Materialklasse).....136
Abbildung 69: Abfallprognose der Verbundwerkstoffe aus der GFK Materialklasse; kumulierte Abfallmenge: 363.127 t (Rechnung 2, Material- und Leistungsklasse). 137
Abbildung 70: Abfallprognose der Verbundwerkstoffe aus der GFK/CFK Materialklasse; kumulierte Abfallmenge: 211.721 t (Rechnung 2, Material- und Leistungsklasse). 137
Abbildung 71: Abfallprognose für GFK-Verbundwerkstoffe; kumulierte Abfallmenge: 558.657 t (Rechnung 2, Material- und Leistungsklasse).....138
Abbildung 72: Abfallprognose für CFK-Verbundwerkstoffe; kumulierte Abfallmenge: 16.190 t (Rechnung 2, Material- und Leistungsklasse).....139
Abbildung 73: Vergleich der Abfallprognosen aktuelle Studie und Vorgängerstudie von Zotz et al. (2019); kumulierte GFK-Abfallmenge: (Rechnung 2, GFK, Material- und Leistungsklassen).....140
Abbildung 74: Abfallprognose der Verbundwerkstoffe aus der GFK/CFK Materialklasse für Szenarien mit niedrigem, mittlerem und hohem CFK-Anteil in Rotorblättern (Rechnung 3, Material- und Leistungsklasse).....142

Abbildung 75: Vergleich der Abfallprognosen aktuelle Studie und Vorgängerstudie von Zotz et al. 2019; kumulierte CFK-Abfallmenge: (Rechnung 2, CFK aus GFK/CFK, Material- und Leistungsklassen). 143
Abbildung 76: Erwartete kumulierte Abfallmenge zwischen 2021 und 2040 von faserverstärkten Kunststoffen [in Tonnen] aus Rotorblättern des deutschen WEA-Bestandes in regionaler Auflösung (PLZ-Gebiete). 144
Abbildung 77: Prognose der GFK-Abfallmengen (oben) und der CFK/GFK-Abfallmengen (unten) aus Rotorblättern in Deutschland im Zeitverlauf (Vergleich von Rechnung 1 und 2). 146
Abbildung 78: Prognose der gesamten Abfallmengen aus Rotorblättern in Deutschland im Zeitverlauf (Vergleich von Rechnung 1 und 2), inkl. faserverstärkte Kunststoffe, Metalle, Core-Materialien, Klebstoffe und Lacke/Farben. 147
Abbildung 79: Prozentuale (oben) und absolute [in GW] Altersverteilung (unten) installierter onshore WEA in ausgewählten europäischen Ländern. 151
Abbildung 80: Ablaufschema zur Risikobeurteilung der beim Rückbau und der Verwertung von Rotorblättern freiwerdenden Stäube und Fasern anhand von Gefährlichkeit und Exposition. 155
Abbildung 81: Schematische Zusammenfassung einiger relevanter, nationaler Gesetze und Regularien beim Abbau eines Rotorblatts am Standort der Windenergieanlage (WEA). 155
Abbildung 82: Bereiche des humanen Atemtrakts zur Einteilung der Eindringtiefen von Aerosolen. 158
Abbildung 83: Konvention über die einatembare, thorakale und alveolengängige Fraktion in Prozent der gesamten Schwebstoffe. 159
Abbildung 84: Auswahl der geeigneten Richtlinien für den Umgang mit Materialien. 162
Abbildung 85: Risikobewertung als Produkt aus Gefährlichkeit und Exposition. 163
Abbildung 86: Risikobewertung und Exposition. 163
Abbildung 87: Zusammenhang zwischen Dosis und Wirkung. 164
Abbildung 88: Zusammenhang zwischen Risikobereichen und Maßnahmen in der Anwendung zum Arbeitsschutz. 165
Abbildung 89: Matrix zur Risikoermittlung für Stäube am Arbeitsplatz nach NanoGRAVUR. 167
Abbildung 90: Gruppierung von anorganischen Fasern in Abhängigkeit von Material und Form. 169
Abbildung 91: Darstellung marktüblicher Carbonfasern in Abhängigkeit ihrer Eigenschaften. 170
Abbildung 92: Thermischer Abbau von Carbonfasern. 171
Abbildung 93: Abhängigkeit der Stärke der kanzerogenen Wirkung von Länge, Durchmesser, Gestalt und Beständigkeit der Fasern. 176
Abbildung 94: Mechanismen der Phagozytose und frustrierten Phagozytose an Fremdkörpern unterschiedlicher Geometrie. 177
Abbildung 95: Übergreifendes Modell für die Rolle von Länge, Biopersistenz und Clearance im Faserpathogenitätsparadigma. 178

Abbildung 96: Qualitative Darstellung der postexpositionszeitabhängigen Abnahme des Anteils langer (>15 µm) Fasern in der Rattenlunge nach Inhalationsexposition mit p-Aramid-Fibrillen, Chrysotilasbest oder C100/475-Glasfasern. 179
Abbildung 97: Auswahlpfad für den Umgang mit Glasfasern....185
Abbildung 98: Risikoermittlung am Arbeitsplatz nach nanoGRAVUR für Carbonfasern (CF, schwarze Kreise) und Glasfasern (GF, blaue Kreise). 189
Abbildung 99: Mögliche Prozesse auf und durch Fremdstoffe in der Umwelt....190
Abbildung 100: Abbauprozesse an Polyurethanen in der Umwelt....196
Abbildung 101: Risikoabschätzung basierend auf den Daten zur Gefährlichkeit und der Exposition. 197
Abbildung 102: Prozesskette für den Rückbau von Windenergieanlagen und der Verwertung der demontierten Rotorblätter....199
Abbildung 103: Beurteilungsschema für Prozesse zur Bearbeitung der Rotorblätter. 199
Abbildung 104: Versuchscharakterisik bei der Fasermessung an einer Säge zur Trennung von CFK-Platten. 203
Abbildung 105: Modellbetrachtung zur Materialfreisetzung beim Schneiden der GFK-Hülle eines WEA-Rotorblatts....204
Abbildung 106: Widerstandskräfte an unregelmäßig geformten Partikeln und Fasern im Vergleich zum kugelförmigen Partikel....205
Abbildung 107: Anwendung des Beurteilungschemas auf den Prozess der Bandsäge zur Zerlegung von Rotorblättern. 207
Abbildung 108: Beispiel für die Bewertung: Hauptkriterien-Skala für den Faktor „Lärm“....210
Abbildung 109: Schritte für den Rückbau von Windenergieanlagen....215
Abbildung 110: Darstellung der Wasserstrahlschneider ohne (links) und mit (rechts) Abrasivmittel. 216
Abbildung 111: Hanseatic Rohr GmbH, Demontage Verfahren. 218
Abbildung 112: Funktionsprinzip einer Diamantseilsäge. 218
Abbildung 113: Prozesskinematik eines Diamantsegments in Kontakt mit dem Werkstück. 219
Abbildung 114: Diamantseilsäge Systeme ohne (links) und mit (rechts) Seilführungsrollen. 220
Abbildung 115: Parameter der Zahngeometrie einer Säge. 222
Abbildung 116: Schematischer Aufbau einer Schneidladung. 225
Abbildung 117: Am Fraunhofer-ICT hergestellte Schneidladung. 225
Abbildung 118: Trenneung eines Bauteils mittels Sprengschnüren. Links: Versuchsauafbau vor der Zündung. Rechts: getrenntes Bauteil nach dem Exoeriment. 226
Abbildung 119: Bewertung Demontagetechnologie Wasserstrahl (Fa. MATETEC). 228
Abbildung 120: Bewertung Demontagetechnologie Seilsäge. 228
Abbildung 121: Bewertung Demontagetechnologie Mobiles Sägen. 229
Abbildung 122: Bewertung Demontagetechnologie unbemannte Demontagekammer. 230
Abbildung 123: Schematische Darstellung der Schnitte unterschiedlicher Schneidverfahren. 230
Abbildung 124: Fließschema der Rotorblattdemontage und Aufbereitung von Rotorblättern. 233
Abbildung 125: Einteilung von Zerkleinerungsapparaten nach dem Dispersitätsbereich des Aufgabeguts. 238

Abbildung 126: Durchsätze unterschiedlicher Zerkleinerungsapparate bei einer FVW-Zerkleinerung.....243
Abbildung 127: Leistung von Zerkleinerungsapparaten.....244
Abbildung 128: Durchsatz und spezifischer Energiebedarf bei einer FVW-Zerkleinerung.....244
Abbildung 129: Fließschema der Rotorblattdemontage und der ersten Zuschnittstufe vor Ort an einer WEA.....247
Abbildung 130: Abtrennung metallischer Rotorblattbestandteile und die anschließende Auswahl an Zerkleinerungstechnik.....249
Abbildung 131: Schematischer Gurtaufbau im Querschnitt.....250
Abbildung 132: Konzept der GFK/CFK Abtrennung.....252
Abbildung 133: GFK-Aufbereitungsweg für die Verwertung in Zementwerken.....254
Abbildung 134: Informationsaustausch des Themas Verwertung mit den weiteren wissenschaftlichen Themen im Rahmen des Gesamtprojekts.....265
Abbildung 135: Abfallhierarchie nach §6 Abs. 1 des Kreislaufwirtschaftsgesetzes (KrWG), inkl. gekürzter und vereinfachter Begriffsdefinitionen nach §3 KrWG.....267
Abbildung 136: Erforderliche Daten für eine vollständige Bilanzierung eines Verwertungsprozesses.....268
Abbildung 137: Kriterien und Ablauf zur Durchführung der technischen Beurteilung von Prozessen zur Verwertung aufbereiteter Abfälle aus Rotorblättern.....271
Abbildung 138: Kriterien und Ablaufplan zur Recherche von Prozessanforderungen und Entstehung, bzw. Rückhaltung kritischer Stoffe für geeignete Prozesse der Verwertung aufbereiteter Rotorblattabfälle.....272
Abbildung 139: Übersicht zu in Rotorblättern verbauten Materialien, deren Massenanteile (Albers et al. 2021a) und daraus bestimmte Verwertungskapazitäten.....273
Abbildung 140: Übersicht zu Verfahren des Recyclings und der sonstigen Verwertung von faserverstärkten Kunststoffen.....275
Abbildung 141: Massenspezifischer Energiebedarf bei der mechanischen Zerkleinerung in Abhängigkeit der Produktkorngröße.....277
Abbildung 142: Schematischer Versuchsaufbau zur elektrodynamischen Fragmentierung.....279
Abbildung 143: Schematische Darstellung eines 5-stufigen Marx-Generators.....279
Abbildung 144: Schematische Darstellung der Pyrolyse von FVW, inkl. Produktnachbehandlung. 281
Abbildung 145: Mikrowellen-Bandanlagen der Firma Linn High Therm GmbH. 283
Abbildung 146: Verschiedene Betriebszustände einer Wirbelschicht.....284
Abbildung 147: Druckverlust Δp sowie Höhe h und Porosität ε einer Schüttschicht in Abhängigkeit der Strömungsgeschwindigkeit. 284
Abbildung 148: Einteilung des Schüttguts einer Wirbelschicht nach Geldart. 287
Abbildung 149: Zustandsdiagramm nach REH.....288
Abbildung 150: Schematische Darstellung und wesentliche Parameter der Solvolyse bei tiefen Temperaturen (oben) und unter superkritischen Bedingungen (unten). 289
Abbildung 151: Übersicht zu potentiellen Verfahrensrouten der Verwertung glasfaserhaltiger Abfälle inkl. der jeweils entstehenden Hauptprodukte sowie der abfallrechtlichen und technologischen Einordnung.....291

Abbildung 152: Zusammensetzung von Pressmassen mit und ohne GFK-Partikelrecyclat für SMC-Anwendung.....293
Abbildung 153: Verfahrenskette zum Partikelrecycling am Beispiel der Anlage von ERCOM. 293
Abbildung 154: Verfahrensfließbild des ERCOM-Prozesses zur Aufbereitung von FVW.....295
Abbildung 155: Faserlängenverteilung der mittels Hochvolt-Fragmentierung rezyklierten GF in Abhängigkeit der Pulsanzahl bei einer Pulsfrequenz von 1 Hz. 296
Abbildung 156: Vergleich der Faserlängenverteilung zwischen mechanischer Zerkleinerung und der Hochvolt-Fragmentierung von GFK.....297
Abbildung 157: Vergleich der GF-Längenverteilungen zwischen mechanischer Zerkleinerung (rot) und Hochvolt-Fragmentierung (blau).....298
Abbildung 158: WS-Reaktor im Labormaßstab der Universität Nottingham. 300
Abbildung 159: Schematische Darstellung der Zersetzungsprodukte beim Recycling von GFK mittels Solvolyse.....302
Abbildung 160: Aufbau eines Zementwerks.....305
Abbildung 161: Wärmetauscher eines Zementwerks.....306
Abbildung 162: Zusammensetzung relevanter Rohstoffe, Energieträger sowie des Zementklinkers bei der Zementherstellung. Zusätzlich eingetragen ist die Zusammensetzung von GFK-Aschen.....308
Abbildung 163: Übersicht zu potentiellen Verfahrensrouten der Verwertung CF-haltiger Abfälle inkl. der jeweils entstehenden Hauptprodukte sowie der abfallrechtlichen und technologischen Einordnung.....312
Abbildung 164: Spezifischer Energiebedarf beim mechanischen Recycling von GFK und CFK in Abhängigkeit der Recyclingrate.....313
Abbildung 165: Verfahrensfließbild und Massenbilanz aus dem Pilotversuch des entwickelten nass-mechanischen Verfahrens.....314
Abbildung 166: Flussdiagramm der Aufbereitung von CFK-Teilen < 70 mm mittels Hochvolt-Fragmentierung nach dem SELFRAG-Prozess.....315
Abbildung 167: Flussdiagramm der Aufbereitung von CFK-Teilen ≥ 60 mm mittels Hochvolt-Fragmentierung nach dem SELFRAG-Prozess.....315
Abbildung 168: Qualitativer, zeitlicher Verlauf der Rückgewinnung von CFK-Material in Abhängigkeit der aufgegebenen elektrischen Pulse mit den Phasen A (Schwächungsphase), B (Rissausbreitung), C (Fragmentierung) und D (Endphase). 316
Abbildung 169: Schematische Darstellung des Festbettreaktors zur Einflussbestimmung diverser Parameter bei der Pyrolyse von CFK im Labormaßstab. 318
Abbildung 170: Schematische Darstellung der Thermolyzer-Technologie von CHZ Technologies. 323
Abbildung 171: Vereinfachte schematische Darstellung des WS-Reaktors im Technikumsmaßstab zum Recycling aufbereiteter CF-haltiger Abfälle der Universität Nottingham inkl. der wesentlichen Aggregate und Ströme.....325
Abbildung 172: Schematische und vereinfachte Darstellung der wesentlichen Stoff- und Energieströme bei der Herstellung von Calciumcarbid im Elektroniederschachtofen. 331

Abbildung 173: Produktionsrouten für Primärstahl aus Eisenerz sowie Sekundärstahl durch das Schrottrecycling im Elektrolichtbogenofen. 336
Abbildung 174: Jährliche Rohstahlproduktion in Deutschland zwischen 2006 bis 2019. 337
Abbildung 175: Vereinfachtes Verfahrensfließschema zum Recycling von Stahl- und Gussschrott im Elektrolichtbogenofen inkl. der wesentlichen Prozessschritte (orange) und Einsatzstoffe, bzw. Produkte (grün). 339
Abbildung 176: Energie- und Stoffflüsse beim Stahlrecycling im Elektrolichtbogenofen, bezogen auf eine Tonne Rohstahl. 340
Abbildung 177: Teilprozesse beim Kupferrecycling. 351
Abbildung 178: Schmelzöfen für das Konzentrationsschmelzen beim Kupferrecycling. 352
Abbildung 179: Schematische Darstellung eines kippbaren Trommelkonverters (links) und eines kippbaren Rotationskonverters (Top-Blown Rotary Converter, TBRC) zur Verarbeitung von flüssigem Rohkupfer und reichen Kupferschrotten. 353
Abbildung 180: Schematische Darstellung des elektrolytischen Raffinationsverfahrens zur Aufbereitung von Konverterkupfer. 354
Abbildung 181: Reaktionsgleichung. 361
Abbildung 182: Zersetzungsprozess von Polyurethan-Hartschaum. 363
Abbildung 183: Zersetzungsprozess von Polyurethan-Weichschaum. 363
Abbildung 184: Reifegrad der eingesetzten Recycling-Prozesse für GFK und CFK. 367
Abbildung 185: Spezifische Energiebedarfe der eingsetzten Recycling-Prozesse für GFK und CFK. 369
Abbildung 186: Unterschiedliche Produkte aus recycelten Carbonfasern. 370
Abbildung 187: Leichtbaupotential von textilen Produkten aus rCF im Vergleich zu anderen Leichtbaumaterialien. 372
Abbildung 188: Methodik der techno-ökonomischen Analyse (TEA) auf Prozessebene. 378
Abbildung 189: Kumulierte Prozesskosten pro kg Rotorblattabfall (bei 6000 t Jahreskapazität einer elektrisch beheizten Anlage, ohne Vorkette). 384
Abbildung 190: Verteilung der Recherche-Ergebnisse. 553
Abbildung 191: Materialien im Rotorblatt und abgeleitete Bauteile 561
Abbildung 192: CFK-Aufbau am Gurt im Querschnitt. 561
Abbildung 193: Schematische Darstellung des Hochofenprozesses zur Herstellung von Roheisen inkl. wesentlicher Edukte und Produkte sowie Reaktionen. 565
Abbildung 194: Schematische Darstellung der Prozesskette zur Herstellung von Kupfer aus Erzen. 567
Abbildung 195: Sankeydiagramm der wesentlichen Ressourcen und Reststoffe und Emissionen zur Herstellung einer Tonne Kupfer über die Primärroute. 568
Abbildung 196: Vergleichende Massenflussdiagramme der Stahlproduktion über die Hochofenroute (Oxygenstahlwerk) und das Recycling im Elektrolichtbogenofen (Elektrostahlwerk). 569
Abbildung 197: Vergleichende Flussdiagramme des kumulierten Energieaufwandes der Stahlproduktion über die Hochofenroute (Oxygenstahlwerk) und das Recycling im Elektrolichtbogenofen (Elektrostahlwerk). 569
Abbildung 198: Massenflussdiagramm der Aluminiumproduktion über die Primärroute 570

Abbildung 199: Massenflussdiagramm der Aluminiumproduktion über das Recycling von Neuschrotten. 570
Abbildung 200: Massenflussdiagramme der Aluminiumproduktion über Recycling von Altschrotten. 571
Abbildung 201: Flussdiagramm des kumulierten Energieaufwandes der Aluminiumproduktion über die Primärroute. 571
Abbildung 202: Flussdiagramme des kumulierten Energieaufwandes des Recyclings im Inland. .571
Abbildung 203: Flussdiagramme des kumulierten Energieaufwandes des Recyclings nach Import. 572
Abbildung 204: Massenflussdiagramm der Kupferproduktion über die Primärroute. 572
Abbildung 205: Massenflussdiagramm der Kupferproduktion über das Recycling. 572
Abbildung 206: Flussdiagramm des kumulierten Energieaufwandes der Kupferproduktion über die Primärroute. 573
Abbildung 207: Flussdiagramm des kumulierten Energieaufwandes der Kupferproduktion über das Recycling im Inland. 573
Abbildung 208: Flussdiagramm des kumulierten Energieaufwandes der Kupferproduktion über das Recycling nach Import. 573
Abbildung 209: Schematische Darstellung der Aufbereitung von Salzschlacken aus dem Aluminiumrecycling nach dem B.U.S.-Verfahren. 578
Abbildung 210: Berechnung des Netto Energieverbrauchs eines Rotorblatts über seinen Lebenszyklus. 582

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Eigenschaften von duroplastischen Harzsystemen. 78
Tabelle 2: Mechanische Eigenschaften unterschiedlicher Fasertypen. 79
Tabelle 3: Mechanische Eigenschaften unterschiedlicher Glasfasertypen. 79
Tabelle 4: Vorteile und Nachteile von Gelcoats- und Lack- Materialien für Rotorblätter. 82
Tabelle 5: Zusammenfassung der Werkstoffe, die in Rotorblättern verbaut sind (aus Kapitel 2.2.3). 83
Tabelle 6: Enercon E-66 Wind Turbine. 84
Tabelle 7: Beispiele für Geometrien und Gewicht. 85
Tabelle 8: Materialzusammensetzung eines typischen Rotorblatts: 45,2 m 1,5 MW. 86
Tabelle 9: Ursachen für Schäden an Rotorblättern. 90
Tabelle 10: Untersuchte WEA im Auszug des Marktstammdatenregisters in Deutschland. 109
Tabelle 11: Vergleich von Datenbanken und Studien zur Anzahl von WEA (in Betrieb) in Deutschland. 109
Tabelle 12: Datenlücken im Auszug „Erweiterte Einheitenübersicht“ des MaStR für die projektrelevanten Eigenschaften. 110
Tabelle 13: Schlüsselpaare zur Verbindung von Informationen aus älteren Registern und dem Auszug des MaStRs. 111
Tabelle 14: Datenqualität des MaStR vor und nach der Datenaufbereitung und Ergänzung durch migrierte Datensätze aus älteren Registern sowie durch die Bildung von Schlüsselpaaren und manueller Recherche. 112
Tabelle 15: Übersicht der im MaStR aufgeführten Kleinstanlagen (Rotordurchmesser <10m). 117
Tabelle 16: Gegenüberstellung von Literaturwerten zum Anteil von WEA mit CFK-Bauteilen in den Rotorblättern und dem CFK-Anteil im Rotorblatt. 141
Tabelle 17: Überblick über die durchgeführten Rechnungen, die zugrundeliegenden Annahmen und die Berechnungsergebnisse. 144
Tabelle 18: Internationale Nomenklatur für einatembare und alveolengängige Fraktionen. ..159
Tabelle 19: Klassifizierung von Stoffen gemäß der Humankanzerogenität nach der IARC. 160
Tabelle 20: Kanzerogenitätskategorien nach dem Globalen harmonisiertem System zur Einstufung und Kennzeichnung von Chemikalien (GHS). 161
Tabelle 21: In Rotorblättern von Windenergieanlagen zum Einsatz kommende Materialien. 167
Tabelle 22: Auszug aus dem Sicherheitsdatenblatt für Sigrafil-Carbonfasern, Abschnitt 8, Ausgabe von 2018. 172
Tabelle 23: Auszug aus dem Sicherheitsdatenblatt für Tenax-Carbonfasern, Abschnitt 8, Ausgabe von 2021. 172
Tabelle 24: Definitionen, Werte und Geltungsbereiche verschiedener TRGS. 173
Tabelle 25: Zusammenfassung der wesentlichen Beobachtungen von Wang et al. (2017). 180
Tabelle 26: Zusammenstellung der in-vivo-Studien an Ratten, die im Rahmen der NASA-Studie durch Yoder et al. betrachtet wurden. 181
Tabelle 27: Einordnung von künstlich hergestellten, glasigen (Silikat-) Fasern bezüglich ihres kanzerogenen Potentials. 186

Tabelle 28: Eigenschaften der in Rotorblättern von Windenergieanlagen vorwiegend zum Einsatz kommenden Arten von Glasfasern (nach Kapitel 2.2.3.2). 187
Tabelle 29: Ökotoxikologische Werte für eine kommerzielle Carbonfaser, die mit der CAS-Nummer 7440-44-0 als „Kohlenstofffaser (nicht graphitisch (Carbon))“ angegeben werden.....194
Tabelle 30: Ökotoxikologische Werte für kommerzielle Glasfasern. 195
Tabelle 31: Ökotoxikologische Werte für kommerzielle Epoxidharze. 195
Tabelle 32: MEGA-Daten für Arbeitsplätze zur Herstellung und Verarbeitung von Glasfasern und Mineralfasern. 201
Tabelle 33: MEGA-Daten für Arbeitsplätze mit spanenden Bearbeitungsverfahren in der Herstellung und Verarbeitung Faserverstärkte Kunststoffe. 202
Tabelle 34: Abschätzung einer Faserzahl beim Trennen der Faserverbundwerkstoffhülle eines Rotorblatts.....204
Tabelle 35: Aerodynamischer Äquivalentdurchmesser d_{ae} von Carbonfasern unterschiedlicher Längen l_F bei einem typischen Durchmesser von d_F = 7 µm und einer Materialdichte von ρ_F = 1,8 g/cm³.....206
Tabelle 36: Technologische und wirtschaftliche Kriterien. 210
Tabelle 37: Punktekatalog für die Kriterien zur Beurteilung von Partikelemissionen 211
Tabelle 38: Punktekatalog für die Kriterien zur Beurteilung der Bodenverdichtung.....212
Tabelle 39: Punktekatalog für die Kriterien zur Beurteilung des Umgangs mit Prozesswasser 212
Tabelle 40: Punktekatalog für die Kriterien zur Beurteilung der Sicherheit 212
Tabelle 41: Punktekatalog für die Kriterien zur Beurteilung der Lärmbelastung 213
Tabelle 42: Punktekatalog für die Kriterien zur Beurteilung des Montageziels 213
Tabelle 43: Punktekatalog für die Kriterien zur Beurteilung des Sortenreinheit und -Qualität 213
Tabelle 44: Punktekatalog für die Kriterien zur Beurteilung des Sortenreinheit und -Qualität 214
Tabelle 45: Diamantsäge und Modellspezifikationen. 222
Tabelle 46: Abbruchzange und Modelspezifikationen. 223
Tabelle 47: Technologische und wirtschaftliche Kriterien zur Beurteilung von Aufbereitungsprozessen. 234
Tabelle 48: Produktkriterien von Stoffströmen für die Verwertungsrouten. 236
Tabelle 49: Einteilung von Zerkleinerungsapparaten nach ihrem Einsatzgebiet bezüglich der Materialeigenschaften.....238
Tabelle 50: Einteilung der Zerkleinerungsapparate nach Beanspruchungsart für FVK. 240
Tabelle 51: Klassier- und Sortierverfahren von Rotorblattmaterialien.....246
Tabelle 52: Zuordnung der Technologiereife anhand der Rotorblattmaterialien und den ausgewählten Prozessen. 256
Tabelle 53: Spezifischer Energiebedarf und Durchsatz der FVW-Zerkleinerung. 257
Tabelle 54: Zuordnung Materialverschleiß und Zerkleinerungsapparat.....258
Tabelle 55: Zuordnung theoretischer Verschleiß und Zerkleinerungsapparat. 259
Tabelle 56: Vor- und Nachteile von Zerkleinerungsapparaten. 261

Tabelle 57: Skala zur Einordnung des Technologiereifegrades (TRL) von Verfahren. 269
Tabelle 58: Klasseneinteilung des Schüttguts einer Wirbelschicht nach Geldart. 287
Tabelle 59: Kritische Drücke und Temperaturen ausgewählter Lösemittel.....290
Tabelle 60: Eigenschaften der Rezyklat-Produkte des ERCOM-Prozesses.....295
Tabelle 61: Gegenüberstellung der mechanischen Eigenschaften von primären Glasfasern sowie von mittels mechanischer Zerkleinerung und Hochvolt-Fragmentierung (HVF) gewonnener Glasfasern.....298
Tabelle 62: Verbleibende Zugfestigkeiten von in verschiedenen Prozessen rezyklierten Glasfasern (rGF) gegenüber Neufasern.....303
Tabelle 63: Übersicht der wesentlichen Informationen zu den europäischen Pyrolyseanlagen der Firmen Mitsubishi Chemical Advanced Materials GmbH, Gen2Carbon, Reciclalia S.L und Karborek RCF S.R.L. 321
Tabelle 64: Gemessene Zugfestigkeiten und E-Moduln von unbehandelten PAN-basierten Carbonfasern (vCF) und den jeweils im WS-Reaktor bei 550 °C rezyklierten Carbonfasern (rCF). 326
Tabelle 65: Vergleich der mechanischen Eigenschaften von Carbonfasern vor und nach dem Recycling von CFK mittels Solvolyse. 327
Tabelle 66: Verbleibende Zugfestigkeiten von in verschiedenen Prozessen rezyklierten Carbonfasern (rCF) gegenüber Neufasern. 329
Tabelle 67: Zusammenfassung der CF-erhaltenden Verfahren zum Recycling von CFK.....329
Tabelle 68: Ergebnisse zur ganzheitlichen Bilanzierung von Stahl aus der Primärroute (Hochofen) gegenüber von Stahl aus dem Recycling (Elektrolichtbogenofen).....338
Tabelle 69: Ergebnisse zur ganzheitlichen Bilanzierung von Aluminium-Mix frei Halbzeugwerk (Deutschland) aus der Primärroute gegenüber dem Recycling. 342
Tabelle 70: Vor- und Nachteile verschiedener Ofentypen des Aluminiumrecyclings. 344
Tabelle 71: Typische Verunreinigungen und deren Einfluss auf die Qualität des rezyklierten Aluminiums.....345
Tabelle 72: Typische Abmessungen für Nichteisenmetallschrott.....346
Tabelle 73: Klassifizierung verschiedener Aluminiumschrottsorten.....346
Tabelle 74: Auszug aus der Aluminiumschrott-Klassifizierung nach der DIN EN 13920. 348
Tabelle 75: Ergebnisse zur ganzheitlichen Bilanzierung von Kupfer-Mix frei Halbzeugwerk (Deutschland) aus der Primärroute gegenüber dem Recycling. 349
Tabelle 76: Auszug der Klassifizierung von Kupferschrott. 357
Tabelle 77: Zerkleinerung von Balsaholz mit einer Hammer- und Schneidemühle. 359
Tabelle 78: Zerkleinerung von Rotorblattteilen mit einer Hammermühle und EcoPulser-Verfahren.....359
Tabelle 79: Technischer Reifegrad (TRL) der Verwertungsprozesse für GFK und CFK. 366
Tabelle 80: Spezifische Energiebedarfe der Verwertungsprozesse für GFK und CFK. 367
Tabelle 81: Zusammenfassung erzielbarer mechanischer Kennwerte für gestreckte rCF/PA6-Tapes (Proben 3.1 bis 4.4). 373
Tabelle 82: Übersicht Bewertungsansätze Rotorblatt Recycling von Windenergieanlagen....376
Tabelle 83: Annahmen zu Recyclinganlagen mit jährlichen Rezyklat-Produktionsvolumina von 6000 t.....381

Tabelle 84: Übersicht des jährlichen Outputs an Glasfaserrezyklat (rGF). 382
Tabelle 85: Annahmen zu Rezyklatqualität im Vergleich zur Virgin Glasfaser (vGF). 382
Tabelle 86: Annahmen zur Virgin Glasfaser. 382
Tabelle 87: Ergebnisse des theoretischen Reingewinns. 383
Tabelle 88: Aktueller Stand der Unternehmen 561
Tabelle 89: Edukt- und Produktmengen eines großen Hochofens mit einem Gestelldurchmesser von 15 m und einem Gesamtvolumen von 6.000 m³. 564
Tabelle 90: Chemische Zusammensetzung von zinkreichem Feinstaub des Elektrolichtbogenofens sowie zinkarmen Stahlwerksstaub 574
Tabelle 91: Zusammenstellung zu Mengen, Vermeidung und Verwertung verschiedener Reststoffe aus dem Aluminiumrecycling sowie deren Umweltrelevanz. 575
Tabelle 92: Chemische Zusammensetzung von verschiedenen Aluminiumkrätzen. 576
Tabelle 93: Zusammensetzung von Salzschlacke (flüssige Rückstände) und Salzkuchen (feste Rückstände) aus Aluminiumschmelzen. 577
Tabelle 94: Chemische Zusammensetzung von Filterstaub bei Aluminiumrecycling. 579
Tabelle 95: Reststoffe des Kupferrecyclings und deren Kupfergehalte. 580
Tabelle 96: Chemische Zusammensetzung der Konverterschlacken des Kupferrecyclingprozesses. 580
Tabelle 97: Chemische Zusammensetzung der ZnO-Filterstäube aus den Prozessstufen des Konzentrationsschmelzens und des Konverters beim Kupferrecycling. 581

Abkürzungsverzeichnis

Abl.	Amtsblatt der Europäischen Union
Abs.	Absatz
ABS	Acrylnitril-Butadien-Styrol
AGS	Ausschuss für Gefahrstoffe
AGW	Arbeitsplatzgrenzwert
ASGW	Allgemeiner Staubgrenzwert
A-Staub	Alveolengängiger Staub
BAuA	Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin
BArBl.	Bundesarbeitsblatt
BBodSchG	Bundes-Bodenschutzgesetz
BBodSchV	Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung
BGBl.	Bundesgesetzblatt
BImSchG	Bundes-Immissionsschutzgesetz
BImSchV	Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BMC	Faser-Matrix-Halbzeuge, engl.: Bulk Molding Compound
BSW	Badische Stahlwerke GmbH
CaC2	Calciumcarbid
CAS	Chemical Abstracts Service
CF	Carbonfaser
CFC	Carbon Fibre Cycle
CFK	Carbonfaserverstärkte Kunststoffe
CLP	Classification, Labelling and Packaging (Einstufung, Kennzeichnung und Verpackung)
CNT	Carbon Nanotube (Kohlenstoffnanoröhren)
CO	Kohlenmonoxid
CU (CC)	Composites United e.V. (zuvor Carbon Composites e.V.)
CRS	Composite Recycling System
DEHSt	Deutsche Emissionshandelsstelle
DepV	Deponieverordnung
DGUV	Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e.V.
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V.
DMEL	Derived Minimum Effect Level
DNEL	Derived No Effect Level
DS	Drückseite
EAF	Elektrolichtbogenofen, engl.: Electric Arc Furnace
EDF	elektrodynamischen Fragmentierung

EG	Europäische Gemeinschaft
EHF	elektrohydraulischen Fragmentierung
ELST	Early Life Stage Test
E-Modul	Elastizitätsmodul
EN	Europäische Norm
EoL	Lebenszyklusende, engl.: End-Of-Life
EP	Epoxid(harze)
EPA	Environmental Protection Agency (US Umweltschutzbehörde)
ERB	Expositions-Risiko-Beziehung
E-Staub	Einatembarer Staub
F	Fasern
Fraunhofer ICT	Fraunhofer Institut für Chemische Technologie
FVK	Faserverstärkte Kunststoffe
FVW	Faserverbundwerkstoff
GefStoffV	Gefahrstoffverordnung
GESTIS	Gefahrstoffinformationssystem der IFA
GF	Glasfaser
GFK	Glasfaserverstärkte Kunststoffe
GMBl.	Gemeinsames Ministerialblatt
GrwV	Grundwasserverordnung
GWBB	Grenswaarden voor beroepsmatige blootstelling (Maximale Arbeitsplatz-Konzentration)
H2	Wasserstoff
HK	Hinterkante
HM	High Modulus (Hochmodul)
HRTM	Human Respiratory Tract Model der IRCP
HSE	Hochspannungsentladung
HT	High Tenacity
IEC	International Electrotechnical Commission
IFA	Institut für Arbeitsschutz der DGUV
IGCV	Fraunhofer-Institut für Gießerei-, Composite- und Verarbeitungstechnik
IIP	Institut für Industriebetriebslehre und Industrielle Produktion am KIT
IM	Intermediate Modulus
IRCP	International Commission on Radiological Protection (Internationale Strahlenschutzkomission)
ISO	International Organization for Standardization
ITAD	Interessensgemeinschaft der thermischen Abfallbehandlungsanlagen in Deutschland
ITC	Institut für Technische Chemie am KIT

IVW	Institut für Verbundwerkstoffe GmbH
kA	Kilo Ampere
KEA	kumulierter Energieaufwand
KI	Kanzerogenitätsindex
KIT	Karlsruher Institut für Technologie
KOH	Kaliumhydroxid
KrWG	Kreislaufwirtschaftsgesetz
Kzw	Kurzzeitwert
LAGA	Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall
LC0	lethal concentration 0 (Letale Dosis 0)
LC50	lethal concentration 50 (Letale Dosis 50)
LC100	lethal concentration 100 (Letale Dosis 100)
LCoE	levelized cost of electricity (Stromgestehungskosten)
LDH	Lactat Dehydrogenase
LD50	Letale Dosis 50
LEP	leading edge protection (Schutz der Vorderkante)
MAK	Maximale Arbeitsplatz-Konzentration
MaStR	Marktstammdatenregister
MCAM	Mitsubishi Chemical Advanced Materials GmbH
MEGA	Messdaten zur Exposition gegenüber Gefahrstoffen am Arbeitsplatz, Datenbank der IFA
MGU	Messsystem Gefährdungsermittlung der Unfallversicherungsträger
MMVF	man-made vitreous fibres (künstliche Fasern)
MVA	Hausmüllverbrennungsanlage
MW	Megawatt
NaOH	Natriumhydroxid
NASA	National Aeronautics and Space Administration (US-amerikanische Luft- und Raumfahrtbehörde)
NIOSH	National Institute for Occupational Safety and Health (US-amerikanische Bundesbehörde für arbeitsmedizinische Forschung)
NOEC	No Observed Effect Concentration
NOEL	No observable effect level
NP	Nanopartikel
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development (Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (OWZE)
OEL	Occupational Exposure Limit
OEM	Original Equipment Manufacturer (Erstausrüster)
PA	Polyamid
PAK	polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe
PAN	Polyacrylnitril

PC	Polycarbonat
PCB	polychlorierte Biphenyle
PCDD	polychlorierten Dibenzodioxine
PCDF	polychlorierten Dibenzofurane
PE	Polyethylen
PEEK	Polyetheretherketon
PET	Polyethylenterephthalat
PICMA	partikel-induzierter Zellmigrationstest
PLA	Polylactid
PM	Particulate Matter
PM2.5	Particulate Matter 2,5 (Mikrometer)
PM10	Particulate Matter 10 (Mikrometer)
PMI	Polymethacrylimid
PMMA	Polymethylmethacrylat
PP	Polypropylen
PS	Polystyrol
PSA	Persönliche Schutzausrüstung
PTFE	Polytetrafluorethylen
PUR	Polyurethane
PVC	Polyvinylchlorid
RCC	Renal Cell Carcinoma
rCF	Rezyklierte Carbonfasern
Refoplan	Ressortforschungsplan
REM	Rasterelektronenmikroskop
REM - EDX	Rasterelektronenmikroskop mit energiedispersiver Röntgenspektroskopie
rGF	rezyklierte Glasfaser
SAN	Styrol-Acrylnitril
SDB	Sicherheitsdatenblatt
SEM	Scanning Electron Microscopy (Rasterelektronenmikroskopie)
SMC	Plattenförmige Faser-Matrix-Halbzeuge, engl.: Sheet Molding Compound
sog.	sogenannt
SS	Saugseite
SVA	Sonderabfallverbrennungsanlage
TA Lärm	Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm
TA Luft	Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft
TEM	Transmissionselektronenmikroskop
TGA	Thermogravimetrische Analyse
Tmw	Tagesmittelwert
TRGS	Technische Regeln für Gefahrstoffe

TRL	Technologiereifegrad, engl.: Technology Readiness Level
TRK	Technische Richtkonzentration
U+D	unidirektionale
UBA	Umweltbundesamt, Dessau
Ufoplan	Umweltforschungsplan
UHM	Ultra High Modulus
UM	Ultra Modulus
UP	Ungesättigte Polyester(harze)
UPR	Ungesättigte Polyesterharze
UVO-Staub	Unverbrannter Ofenstaub bei der CaC2-Herstellung
UVT	Unfallversicherungsträger
v. H.	von Hundert
VARTM	Vacuum assisted resin transfer molding (Vakuuminfusionsverfahren)
VBG	Verwaltungs-Berufsgenossenschaft
vCF	Carbonneufaser, engl.: virgin carbon fiber
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VE	Vinylester(harze)
VGF	Glasneufaser, engl.: virgin glass fiber
VK	Vorderkannte
VLEP	Valeurs limites d'exposition professionnelle (Maximale Arbeitsplatz-Konzentration)
WEA	Windenergieanlage
WHG	Wasserhaushaltsgesetz
WHO	World Health Organization (Weltgesundheitsorganisation)
WGK	Wassergefährdungsklasse

Zusammenfassung

Als Ergebnis der breiten politischen Befürwortung für die Energiewende und des stetig wachsenden Bestands an Windenergieanlagen (WEA) in Deutschland und Europa gewinnen Fragen der Wartung, Laufzeitverlängerung sowie des Anlagenrückbaus und Recyclings an Bedeutung.

Eine besondere Herausforderung stellt dabei das Rotorblattrecycling dar. Neben glasfaserverstärkten (GFK) werden carbonfaserverstärkte Kunststoffe (CFK) in diesen Anlagenteilen eingesetzt. Die für diese Materialien existierenden Recyclingprozesse haben sich allerdings noch nicht durchgesetzt und müssen über den Aufbau von Standards sowie die Erschließung von relevanten Märkten für den Wiedereinsatz der recyclierten Materialien noch in der Breite etabliert werden. Es mangelt auch an Standards für die Demontage und werkstoffliche Aufbereitung dieser Materialien. Auf diese gleich mehrere Branchen betreffende Problematik wies im Jahr 2019 der umfassende Bericht „Entsorgung faserhaltige Abfälle“ der Bund-Länder-Arbeitsgruppe Abfalltechnik hin.

Die vorliegende Studie erfolgte auf der Basis von Literaturrecherchen, Experteninterviews und eigenen wissenschaftlichen Ergebnissen. Experimentelle Forschung war nicht Gegenstand der Studie.

Die Studie beschreibt ein erstes umfassendes technisches, rechtliches und organisatorisches Recyclingkonzept für Rotorblätter. Zentraler Forschungsgegenstand war die Entwicklung von Standards für eine möglichst hochwertige und gleichzeitig wirtschaftlich zumutbare Aufbereitungs- und Behandlungsstrategie für Rotorblätter, bei welcher sämtliche Bestandteile eines Rotorblatts hochwertig und schadlos verwertet werden. Ausgehend von den zu erwartenden Abfallmengen und -arten und des speziellen Aufbaus und der Zusammensetzung der verschiedenen Rotorblätter wurde ein vollständiges und schlüssiges Konzept für deren Wartungen, Reparatur, Demontage, Vorzerkleinerung und Aufbereitung. und der vollständigen Entsorgung der einzelnen Abfallströme erarbeitet. Darauf basierend wurde die Organisationsverantwortung aus rechtlicher Sicht geprüft und Vorschläge erarbeitet. Ein Schwerpunkt bildete die Prüfung möglicherweise erforderlicher, ergänzender materiell-rechtlicher Vorgaben für die Entsorgung. Zwar legt das Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) eine starke Betreiberverantwortung fest, doch erfordern spezialisierte Recyclingtechniken Herstellerwissen, weshalb auch Elemente der abfallwirtschaftlichen Produktverantwortung auf Zweckmäßigkeit geprüft und bewertet wurden.

Dies ist ein immenser Fortschritt für den Umgang mit diesen Abfällen, für die auf dem Gebiet des Bauens und des Abbruchs nur wenige Erfahrungen bestehen. Die Ergebnisse sind damit nicht nur ein wichtiger Bestandteil der Verstetigung der Windenergiegewinnung, sondern beschreiben auch methodisch und konzeptionell den State-of-the-Art der Faserverbundwerkstoffaufbereitung.

Abfallarten und Abfallmengen

Erstes Ziel war es, einen vollständigen Überblick der in Deutschland existierenden Rotorblattkonstruktionen zu erarbeiten und deren Materialzusammensetzung und zu erwartenden Mengenströme aus dem Rückbau und des Repowerings der On- und Offshore WEA bis 2040 abzuschätzen.

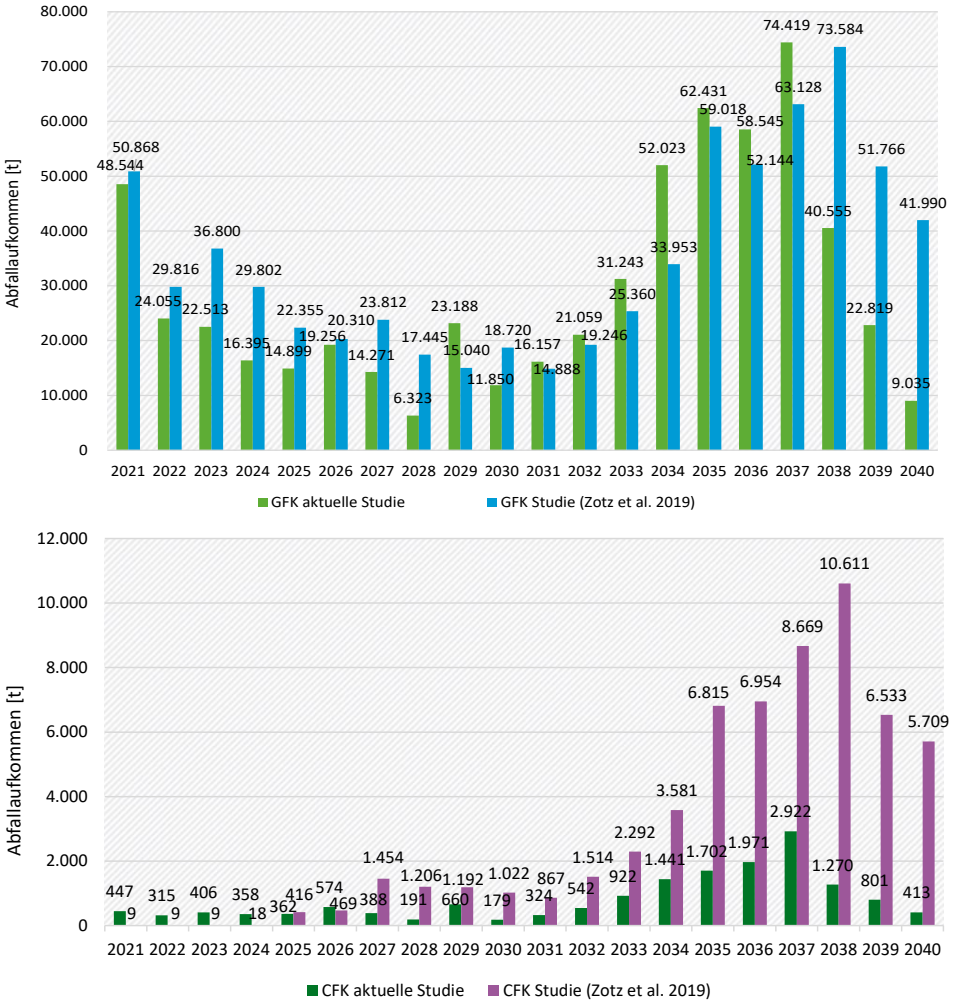
Grundsätzlich ist das Marktstammdatenregister für die Abschätzung des Abfallaufkommens aus Rotorblättern geeignet. Allerdings führen einige Datenlücken insbesondere der Attribute Rotordurchmesser, Nabenhöhe, WEA-Typ und WEA-Hersteller sowie Informationen zur genauen Materialzusammensetzung (Hauptmaterial) und Massen (individuelles Gewicht) der

einzelnen Rotorblätter derzeit zu Unsicherheiten in der Abschätzung. Daher wurden zur Abschätzung der erwarteten Abfallmengen aus Rotorblättern von WEA bis zum Jahr 2040 eine aufwändige Recherche, drei Rechnungen (Regressionen) sowie Szenarioanalysen durchgeführt. Für die Regressionen wurden teilweise Regressionsfunktionen für Deutschland erstellt und genutzt, die den Zusammenhang zwischen Rotorblattlänge und Gesamtgewicht je Rotorblatt je nach Materialklasse (GFK, bzw. GFK/CFK) beschreiben.

Aus den durchgeführten Regressionen lässt sich erkennen, dass sich bis 2040 zwischen 326.000 und 430.000 t GFK-Abfälle aus reinen GFK-haltigen Rotorblättern in Deutschland anfallen werden. Im gleichen Zeitraum ergeben die durchgeführten Analysen zu erwartende Abfallmengen für faserverstärkte Kunststoffe aus Rotorblättern mit GFK- und CFK-Anteilen von 77.000 bis 212.000 t. Zudem zeigt die Analyse, dass je nach Berechnung 11 % bis 32 % der Windkraftanlagen in Deutschland Rotorblätter mit CFK/GFK-Material besitzen, die einen CFK-Anteil von 5 % bis 20 % enthalten.

Die jährlichen geschätzten Abfallmengen liegen zwischen 3.000 und 75.000 t für GFK bzw. zwischen weniger als 1.000 und 3.000 t für CFK. Der zeitliche Verlauf der Abfallmengen zeigt einen deutlichen Anstieg in beiden Materialklassen Anfang der 2030er-Jahre, was in folgender Abbildung dargestellt ist.

Vergleich der Abfallprognosen der aktuellen Studie und der Vorgängerstudie von Zotz et al. 2019; kumulierte GFK- und CFK-Abfallmenge: (Rechnung 2, GFK und CFK, Material- und Leistungsklassen).



Quelle: Eigene Darstellung, KIT/IIP.

Die Prognose der gesamten Abfallmengen aus Rotorblättern in Deutschland im Zeitverlauf zeigt Mengen zwischen 10.000 t und 75.000 t jährlich. Eine parallele Studie von Sommer et al. (2020) bestätigen diese quantitativen Ergebnisse. Diese Abfälle enthalten neben den faserverstärkten Kunststoffen auch Metalle, Balsaholz und PU-Schäume, Klebstoffe und Lacke/Farben.

Die räumliche Analyse und Verteilung des erwarteten Abfallaufkommens aus Rotorblättern auf detaillierter, regionaler Ebene (Postleitzahlgebiete) in Deutschland zeigt keinen klaren regionalen Trend. In Norddeutschland befinden sich jedoch mehr WEA, so dass dort auch mehr Rotorblattabfälle entstehen werden. Für den Zeitraum bis zum Jahr 2040 fällt auf der Ebene der Länder der Großteil der GFK Abfälle in Niedersachsen mit 81.288 t, in Nordrhein-Westfalen mit 42.571 t und in Schleswig-Holstein mit 41.360 t an. In der Materialklasse GFK/CFK sind bis 2040 für Brandenburg 34.159 t, für Niedersachsen 30.017 t und für Schleswig-Holstein 18.252 t zu erwarten. Die Landkreise Prenzlau (Brandenburg) und Bredstedt (Schleswig-Holstein) fallen dabei mit 2.504 t sowie 2.469 t als lokale Zentren auf und überschreiten dabei kumulierte GFK Abfallmengen von über 2.000 t.

Eine allgemeine Herangehensweise zur Quantifizierung von Rotorblattabfällen ist kompliziert und nur mit erhöhtem Aufwand möglich. Weiterhin beeinträchtigen einige Unsicherheiten bei der Datenerhebung und -verfügbarkeit die Genauigkeit der Abfallprognose wie die Bestimmung des Anteils an CFK-haltigen Rotorblättern im Anlagenbestand, die Bestimmung des CFK-Anteils je Rotorblatt sowie Datenlücken im Marktstammdatenregister. Auch wenn das Markstammdatenregister nicht für die Erstellung von Abfallbilanzen betrieben wird, ließe sich durch zeitnahe Aktualisierung, Auffüllen der bestehenden Datenlücken und Erweiterung des Datensatzes die Qualität der Prognosen erheblich verbessern. Durch die Einführung eines digitalen Produktpasses für WEA oder Rotorblätter wäre es möglich, die Abfallprognosen quantitativ und qualitativ erheblich zu verbessern und damit frühzeitig die notwendigen Aufbereitungs- und Entsorgungskapazitäten anzupassen. Detailliertes Produktwissen erleichtert das Recycling komplexer Produkte erheblich.

Aufbau von Rotorblättern sowie Wartung und Reparatur

Im Wesentlichen besteht der Aufbau eines Rotorblatts aus zwei Halbschalen (Unter- und Oberschale), die bei der Herstellung in Sandwichbauweise an Vorder- und Hinterkante mittels Harzkleber miteinander verbunden werden. Die Materialien lassen sich grundsätzlich in drei Fraktionen untergliedern:

a) Faserverbundstoffe und deren Bestandteile (Glasfasern und Carbonfasern, Epoxidharze, Vinylharze),

b) Metalle (Eisen, Kupfer, Aluminium, Blei) sowie weitere Materialien (z.B. elektrische bzw. elektronische Komponenten)

c) Schäume, Balsaholz, Lacke, Beschichtungen und weitere.

Gewichtsmäßig bilden den größten Anteil die Faserverbundstoffe mit mindestens 70 %. In neueren und größeren WEA kommt zunehmend CFK zum Einsatz. Zu berücksichtigen ist ferner, dass zum Teil Bleischrot als Ausgleichsmasse in Rotorblättern eingesetzt werden, ein gefährlicher Abfall.

Bereits während der Konstruktion ist Langlebigkeit und Beständigkeit gegen Wind und Wetter ein wichtiges Kriterium. Wetterfeste Beschichtungen sind erforderlich und der oft beschriebenen Vorderkantenerosion ist durch konstruktive Maßnahmen entgegenzuwirken. Weiterhin erfordern Rotorblätter regelmäßige Wartung und Inspektion.

Mit Prüfverfahren wie beispielsweise dem Ultraschall-Echo-Verfahren, der lokalen Resonanzspektroskopie, der Computer-Laminographie oder die Wärmefluss-Thermographie können Schäden an Rotorblättern festgestellt werden. Um Inspektionen während des Betriebs durchzuführen, ist außerdem der Einsatz unbemannter Monitoringsysteme möglich. Mithilfe dieser automatisierten ferngesteuerten Inspektionssysteme können Rotorblätter sowohl an on- als auch offshore-WEA zügig inspiziert werden. Dies bildet auch die Möglichkeit einer vorsorgenden Instandhaltung (predictive maintenance), die zukünftig unter Einsatz von Massendaten (big data) und Künstlicher Intelligenz Schäden weiter reduzieren können.

Die Lebensdauer von Rotorblättern lässt sich durch verschiedene Reparaturmaßnahmen, wie Oberflächenbehandlung (z. B. Gelcoat), Injektions- oder Strukturreparaturen verlängern. Die Studie liefert hierfür technische Ansätze und konkrete Maßnahmen. Die Betriebs- und Instandhaltungskosten sind mit 20 % bis 25 % der Stromgestehungskosten zu kalkulieren.

Risikobeurteilung von Fasern und Stäuben von Verbundmaterialien

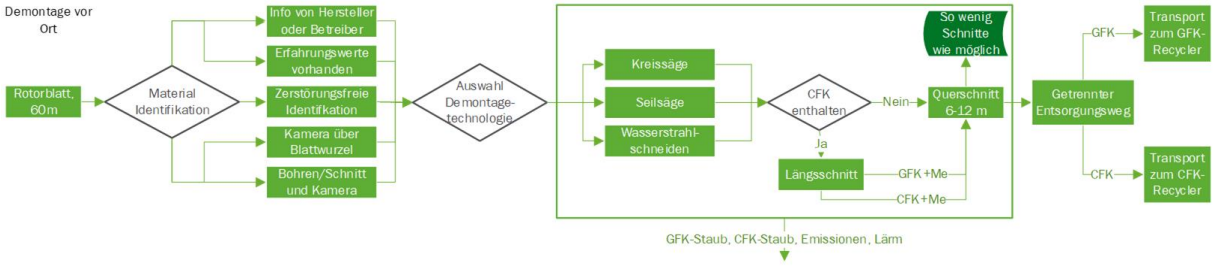
Die Freisetzung von Fasern und Stäuben ist materialunabhängig mit Risiken für Mensch und Umwelt verbunden und betrifft im Wesentlichen spanende Bearbeitungsverfahren, aber auch Zerkleinerungs- und Recyclingtechnologien. Die toxikologischen Fragen stellen sich einmal mehr bei neuen und faserhaltigen Materialien, so dass der Wissenstand auf diesem für den Arbeitsschutz und die Recyclingtechnologie wichtigen Gebiet zusammengefasst wurde. Er umfasst einerseits ein Review der vorhandenen toxikologischen und ökotoxikologischen Studien der Einzelstoffbewertung von Glas- und Carbonfasern und andererseits auch eine Einschätzung von Expositionsszenarios während der vorgesehenen Recyclingprozesse. Das Fazit ist, dass die verwendeten Aggregate gegen die Freisetzung von Fasern und Stäuben ausgestattet sein müssen. Von der Erarbeitung von Grenzwertvorschlägen wurde aus unterschiedlichen Gründen in dieser abfalltechnischen Studie abgesehen.

Toxikologischer Forschungsbedarf wird bei der Beurteilung der Biopersistenz und Wirkung von Glas- und Carbonfasern in der Lunge, dem Verhalten von Faserfragmenten in der Umwelt sowie bei der Ermittlung der Partikel- und Faserkonzentration, die bei den verschiedenen Prozessschritten freigesetzt werden, gesehen. Die Forschungsergebnisse verdeutlichen den Wissenstand, aber auch die Wissenslücken auf diesem sehr komplexen und differenziert zu betrachtenden Gebiet der Human- und Ökotoxikologie. Forschungsbedarf besteht auch in der Methodenentwicklung.

Technische Anforderungen an ein hochwertiges Recycling von Rotorblättern

Die Demontage, Aufbereitung und Verwertung von Rotorblattabfällen erfordern technische Standards und ein Benchmarking der verfügbaren Technologien. Die vorliegende Studie leistet dies nach aktuellem Stand der Technik prozessorientiert. Mit der Demontage beginnend, welche in folgender Abbildung schematisch dargestellt ist, erfolgt eine Bewertung von baustellenseitigen Demontage- und Zerkleinerungsverfahren, dem folgt ein Fließschema für die werksseitige Aufbereitung und Materialseparation und schließlich die Beschreibung der verfügbaren und im Fall von Verbundwerkstoffen fortzuentwickelnden Recyclingverfahren.

Fließschema der Rotorblattdemontage und der ersten Zuschnittstufe vor Ort an einer WEA.



Quelle: Eigene Darstellung, Fraunhofer-ICT.

Baustellenseitige Vorbehandlung

Bei der Demontage und Vorzerkleinerung von Rotorblättern sind entsprechend der Containergrößen Längen von 12 oder 6 Meter üblich. Grundsätzlich sind bei der Zerlegung von Rotorblätter so wenig Schnitte wie möglich durchzuführen, da die baustellenseitige Zerkleinerung gewisse Risiken birgt. Bei den Schneidprozessen sind Emissionen von Stäuben zu vermeiden. Sägestäube sind durch Flüssigkeiten zu binden und aufzufangen. Die aufgefangene Flüssigkeit ist einer Abwasserbehandlung zuzuführen. Die Prozesse sind grundsätzlich eingehaust durchzuführen, was neben einer Verbesserung des Arbeitsschutzes auch zu einer Reduktion der Lärmemissionen beiträgt.

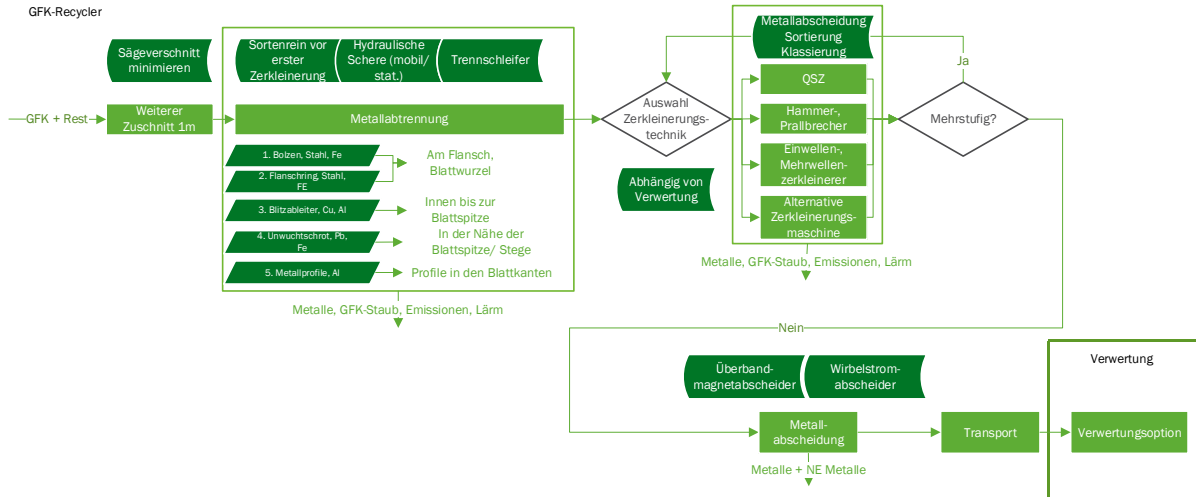
Eine neue Technologie ist die unbemannte und geschlossene Demontagekammer, mit welcher das Rotorblatt im montierten Zustand segmentiert wird. Dieses Systems wird vom Boden aus gesteuert. Es bedarf weder eines Kraneinsatzes noch ist ein zusätzlicher Schutz des Bodens erforderlich. Auf diese Weise reduzieren sich auch die Unfallgefahr sowie die Umweltbelastung. Die Technologie ist sowohl on- als auch offshore einsetzbar.

Werksseitige Aufbereitung

Die weitere Aufbereitung der Rotorblattabfälle erfolgt in der Regel in spezialisierten Aufbereitungsanlagen. Grundsätzlich ist für ein hochwertiges Recycling die Trennung der Materialien in sortenreine Abfallströme und die Vermeidung von Störstoffen in den weiteren Prozessschritten sicherzustellen. Daher könnte eine Beschreibung der eingesetzten Materialien bezüglich Art, Umfang und Ort im Rotorblatt - gegebenenfalls mit Demontagehinweisen - die Aufbereitung erheblich verbessern.

Im Rahmen der Forschungen wurde ein Fließschema für eine pragmatische und die wesentlichen Ressourcen sichernde und verwertende Aufbereitung vorgeschlagen, welches in folgender Abbildung dargestellt ist. Vor der Zerkleinerung muss eine Entfrachtung der Rotorblattabfälle von metallischen Materialien und, soweit nicht schon erfolgt, von den CFK-Gurten stattfinden. Eine Schadstoffentfrachtung ist bei eventuell noch vorkommenden verbauten Bleischroten durchzuführen. In der Regel liegen keine mechanisch lösbaren Verbindungen vor, so dass trennende Verfahren mit hydraulischen Scheren und Trennschleifern eingesetzt werden müssen. Auf eine möglichst saubere Trennung von GFK und CFK ist zu achten, um ein hochwertiges Recycling des CFK sicherzustellen. Die erzwungene Delamination der GFK- und CFK-Schichten mittels hydraulischen Keiles stellt hierbei eine vielversprechende Alternative dar. Es gibt Ansätze, CFK-Gurte nach der Abtrennung des GFK wieder aufzubereiten und direkt als Balken- bzw. Stangenware für neue Produkte einzusetzen. Für diesen Fall muss keine weitere Zerkleinerung des CFK-Materials erfolgen.

Abtrennung metallischer Rotorblattbestandteile und die anschließende Auswahl an Zerkleinerungstechnik.



Quelle: Eigene Darstellung, Fraunhofer-ICT.

Das primäre Ziel der weiteren Zerkleinerung der Rotorblattabfälle ist ein möglichst vollständiger Materialaufschluss. Dazu werden sie in etwa 1 m große Teile zerschnitten und anschließend in einer ersten Zerkleinerungsstufe in etwa 20 cm und in einer weiteren Zerkleinerungsstufe auf etwa 5 cm große Stücke zerkleinert. Mehr als zwei Zerkleinerungsschritte erscheinen im Sinne einer ökologischen und ökonomischen Gesamtoptimierung nicht notwendig. In einigen Fällen wird eine weitere dritte Zerkleinerungsstufe im Feinmahlbereich benötigt, zum Beispiel zur Füllstoffherstellung (Partikelrecycling).

Die Zerkleinerungsaggregate wurden nach Durchsätzen, Energiebedarf, Verschleißangaben, aber auch Materialeigenschaften (Größe, Schüttdichte, Volumen etc.) vor und nach der Zerkleinerung der Abfälle beurteilt. Daten zu größeren Apparaten (Schredder, Brecher und Querstromzerspaner (QSZ)) mit Durchsätzen über 150 kg/h fehlen, wären aber für eine quantitative Bewertung notwendig.

Die vollständige Abtrennung der Eisen und Nichteisenfraktion ist sowohl aus Sicht eines hochwertigen Recyclings der Materialien selbst als auch zur Entfernung als Störstoffe für die weiteren Recyclingschritte notwendig.

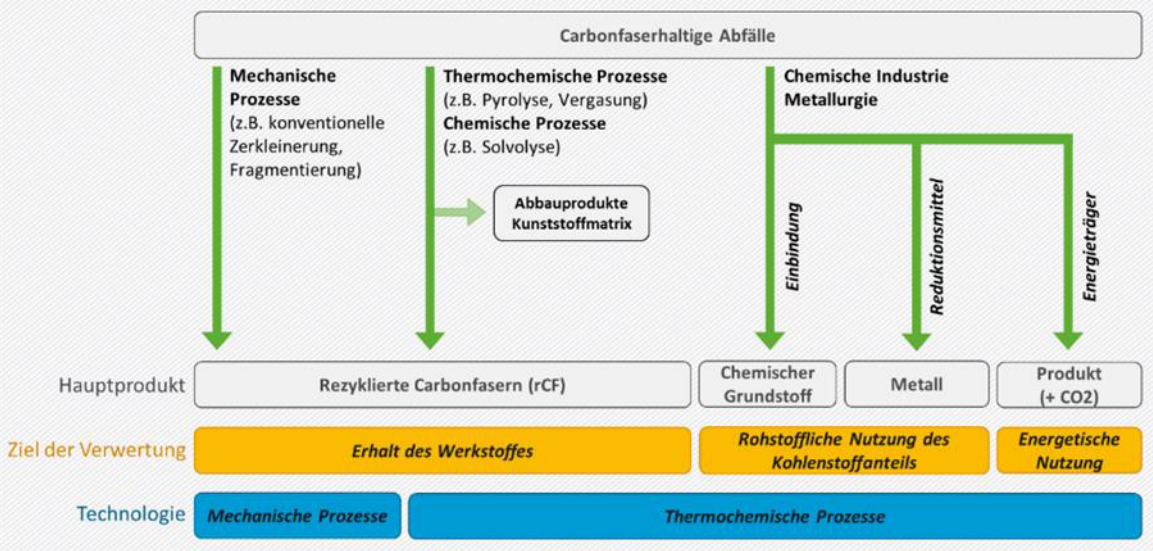
Die Anforderungen an die Aufbereitung der Rotorblattabfälle richtet sich stark an den jeweils sich anschließenden Recycling- und Verwertungsverfahren. Die verfügbaren Verfahren wurden ausführlich beschrieben und bewertet. Das mittelfristige Optimierungspotential liegt in der Prozessabfolge ein umsetzbares Schema wird vorgeschlagen. Ein erster Meilenstein, an dem sich alternative Verfahren messen können, wurde gesetzt und ist für weiterführende Entwicklungen und Technologievergleiche grundlegend.

Recycling und Verwertung

Die aus den aufbereiteten Rotorblattabfällen abgetrennten Eisen- und Nichteisenmetalle werden dem etablierten Metallrecycling getrennt zugeführt. Die Anforderungen dieser Prozesse an Einsatzstoffe, die Prozessführung sowie die Qualität der rezyklierten Metalle und der Umgang mit Reststoffen sind etabliert und ermöglichen ein hochwertiges Recycling.

CFK-Anteile in Rotorblättern sind vorrangig in Längsgurten verbaut, die sortenrein aus dem Rotorblatt herausgetrennt werden können. Wenn eine Weiterverwendung der CFK-Gurte als neue Bauteile nicht sinnvoll ist, erfolgt das Recycling der so gewonnen CFK-Abfälle aktuell mittels Pyrolyse mit dem Ziel der Rückgewinnung rezyklierter Carbonfasern. In Deutschland gibt es aktuell nur eine Pyrolyseanlage mit einer Kapazität von etwa 1.500 t/a, weshalb die Kapazität perspektivisch erhöht werden müsste. Hier muss ein branchenübergreifendes Wachstum des CFK-Abfallaufkommens berücksichtigt werden sowie eine Etablierung vermarktungsfähiger rCF-Produkte. Weitere Prozesswege für CFK-Abfälle sind in folgender Abbildung aufgezeigt.

Übersicht zu potentiellen Verfahrensrouten der Verwertung CF-haltiger Abfälle inkl. der jeweils entstehenden Hauptprodukte sowie der abfallrechtlichen und technologischen Einordnung.

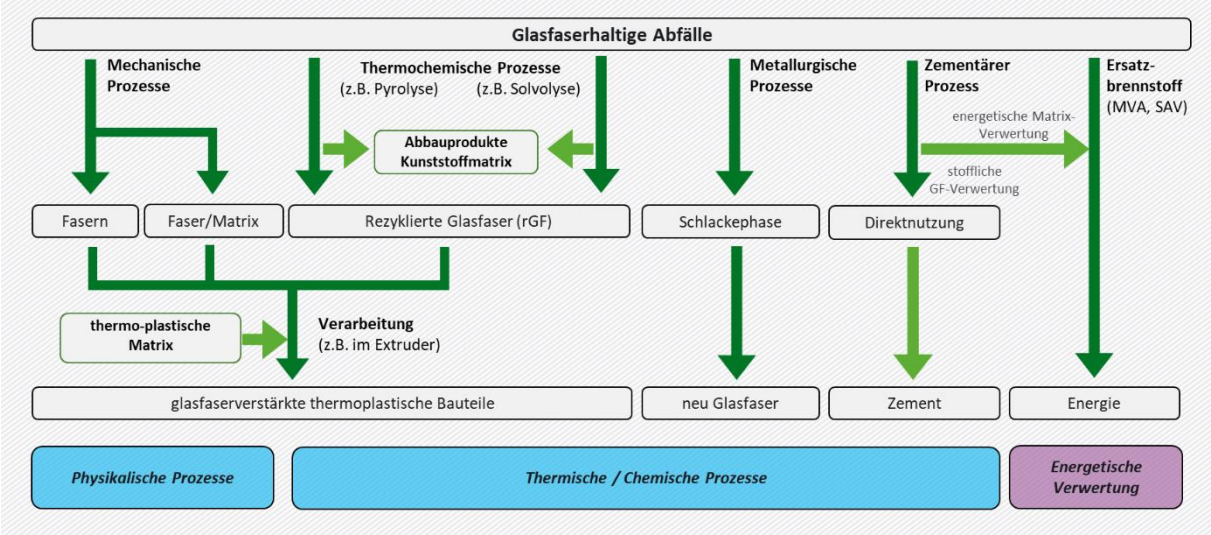


Quelle: Eigene Darstellung, KIT-ITC, mit Änderungen nach Wexler et al. (2021).

Das GFK-Recycling konnte sich bisher nicht am Markt etablieren, was wirtschaftliche und organisatorische Gründe hat. Die Prozesswege für GFK-Abfälle sind in folgender Abbildung aufgezeigt. Einerseits ist die spezialisierte Aufbereitung aufwendig und der Rezyklatwert extrem niedrig, andererseits sind die anfallenden Abfallmengen noch niedrig. Das Kosten-Nutzen-Verhältnis ist daher auch in kontinuierlich arbeitenden Anlagen schlecht. Dies könnte sich eventuell mit steigendem Bedarf der Rotorblattaufbereitung ändern. Abfallbehandlung orientiert sich nicht nur an Wertschöpfung, sondern auch an der Notwendigkeit der sachgerechten Entsorgung. Im Fall von GFK ist die Deponierung aufgrund des hohen Organikanteils ausgeschlossen und Verbrennungsverfahren aufgrund der hohen Schlackebildung durch die Glasfasern ungeeignet. Es bleiben Potenziale bei der Erzeugung mineralischer Werkstoffe oder einer organikreduzierenden Pyrolyse.

Die GFK-Verwertung erfolgt gegenwärtig ausschließlich über den Einsatz im Zementwerk, wo die Glasfasern im Klinker als SiO_2 stofflich und die Matrix energetisch verwertet werden. Die Rotorblattabfälle werden verwertungsspezifisch aufbereitet, wobei GFK, Schäume, Lacke und Beschichtungen sowie Balsaholz zerkleinert und nach deren Aufbereitung als Materialmix im Zementwerkt verwertet werden. Bei der Aufbereitung werden diesem Materialmix im gleichen Massenanteil feuchte Spuckstoffe als Abfallprodukt der Papierherstellung beigemischt, die dem Heizwert dienen, aber auch bei der Aufbereitung entstehende Stäube binden.

Übersicht zu potentiellen Verfahrensrouten der Verwertung glasfaserhaltiger Abfälle inkl. der jeweils entstehenden Hauptprodukte sowie der abfallrechtlichen und technologischen Einordnung.



Quelle: Eigene Darstellung, KIT-ITC.

Entsprechende Forschungs- und Entwicklungsarbeiten sollten technische Alternativen (wie Wirbelschicht, HV-Fragmentierung, Solvolyse) verfolgen, die bisher noch einen geringen Technologiereifegrad (TRL) besitzen, so dass unter zukünftigen Rahmenbedingungen technisch und wirtschaftlich sich ein GFK-Recycling etablieren kann.

Die technischen Kapitel der Studie verdeutlichen die Notwendigkeit qualitätssichernder Maßnahmen für baustellenseitige Tätigkeiten und für die ressourcensichernde Materialseparation im Rahmen einer werksseitigen Aufbereitung. Verordnungen gemäß § 10 des Bundesbodenschutzgesetzes sowie § 10 des Kreislaufwirtschaftsgesetzes bieten baustellenseitig sehr gute rechtliche Möglichkeiten. Technische Normen für Materialerfassung, Demontage, Zerkleinerung vor Ort, Aufbereitung und Verwertung könnten hochwertige Verfahren mit geringerer Verbindlichkeit festschreiben. Abfallrechtliche Herstellerverantwortung wird aufgrund der langen Lebensdauern, des nichtzutreffenden Verursacherprinzips und der immissions- und baurechtlichen Betreiberverantwortung eher kritisch und weniger geeignet eingestuft.

Organisatorische Anforderungen für ein hochwertiges Recycling von Rotorblättern

Empfehlungen zur Organisationsverantwortung und zu den rechtlichen Rahmenbedingungen für eine ordnungsgemäße, schadlose und hochwertige Verwertung der bei der Stilllegung von WEA anfallenden Rotorblattabfälle im Sinne der §§ 6 bis 8 KrWG richten sich in erster Linie an die Bundesregierung, die vom Gesetzgeber verschiedentlich ermächtigt ist, durch den Erlass von Rechtsverordnungen die gesetzlichen Vorgaben zu ergänzen und zu konkretisieren. Ergänzend dazu kann eine behördliche Vollzugshilfe zur Demontage, Aufbereitung und Verwertung der Rotorblattabfälle dazu beitragen, die Rahmenbedingungen für ein erfolgreiches Recycling der Rotorblattabfälle zu verbessern.

Die Empfehlungen beziehen sich unter anderem auf

- eine Verbesserung der Informationslage für die entsorgungspflichtigen Anlagenbetreiber und die von ihnen beauftragten Entsorgungsunternehmen,

- die Konkretisierung materiell-rechtlicher Vorgaben für die Entsorgung von Rotorblattabfällen,
- eine Verbesserung der Entsorgungsüberwachung,
- die Einführung von Rücknahmepflichten für Hersteller und Vertreiber von WEA für den Fall, dass sich die für die ordnungsgemäße, schadlose und hochwertige Entsorgung der prognostizierten Rotorblattabfallmengen in den kommenden Jahren notwendige Entsorgungsinfrastruktur nicht rechtzeitig auf dem Markt eine hinreichende Entsorgungsinfrastruktur entwickelt.

Verbesserung der Informationslage für entsorgungspflichtige Anlagenbetreiber

Für das Recycling von Rotorblättern fehlen den für die Entsorgung verantwortlichen Anlagenbetreibern und den von ihnen zu beauftragenden Entsorgungsunternehmen entsorgungsrelevante Informationen, insbesondere zur Verwendung faserhaltiger Verbundwerkstoffe in den Rotorblättern. Der Verordnungsgeber sollte deshalb dafür sorgen, dass diese Informationen für die Entsorgung von Rotorblattabfällen zukünftig zuverlässig zur Verfügung stehen. Die Informationsgrundlagen können verbessert werden durch

- eine Ergänzung von Pflichtangaben im Marktstammdatenregister,
- eine Kennzeichnung der Rotorblätter,
- und durch Informationspflichten der Hersteller und Vertreiber.

Für das Marktstammdatenregister wird eine ergänzende Verpflichtung durch den Verordnungsgeber empfohlen zu folgenden Angaben:

- Rotorblattgewicht,
- Materialzusammensetzung,
- Konstruktion der Rotorblätter.

Eine Ergänzung der Pflichtangaben zum Marktstammdatenregister um Angaben zur Konstruktion und Materialzusammensetzung von Rotorblättern wäre vom Gesetzeszweck des EnWG und von der Verordnungsermächtigung des § 111e EnWG gedeckt.

Informationspflichten der Hersteller und Vertreiber könnten in der Form eines vom Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU) empfohlenen „Kreislaufpasses“ bzw. eines von der EU-Kommission und der Bundesregierung angestrebten „Digitalen Produktpasses“ eingeführt werden, mit denen Informationen zu Inhaltsstoffen und zu Reparatur- und Recyclingverfahren dauerhaft und leicht zugänglich bereitgestellt werden sollen. Der Kreislaufpass für WEA bzw. Rotorblätter könnte sich auf folgende Angaben erstrecken:

- Rotorblattgewicht, Rotorblattlänge, maximaler und minimaler Rotorblattumfang, Lage und Art der Befestigung am Rotor, Rotordurchmesser, Rotorgewicht, Lage des Schwerpunkts, Lage der Anschlagpunkte, Angabe des dicksten Querschnitts des Rotorblatts in „mm“.
- Hersteller der Anlage und Anlagentyp, Hersteller des Rotorblatts und -typ, sofern bezeichnet, Jahr der Herstellung, Blitzableiter ja/nein, Blattheizung ja/nein, Vorhandensein von Unwuchtschroten, Lage der Kammern, Material der Unwuchtschrote.

- CFK- und GFK-Kennzeichnung, Angaben zu verwendeten Fasern (Fasertyp), Lage, Art und Umfang von CFK-Gurten, Lage, Art und Umfang von hybriden Faserverbundstrukturen, Lage, Art, Umfang und Material von Wuchtgewichten.
- Möglichkeiten der Aufbereitung und der hochwertigen Verwertung der Rotorblattabfälle.

Konkretisierung materiell-rechtlicher Vorgaben für die Verwertung

Ergänzend dazu könnten einige untergesetzliche Regelungen zu Einbindung und Verbleib von Abfällen, die bei der Entsorgung der Rotorblätter anfallen, in Erzeugnissen nach Art, Beschaffenheit oder Inhaltsstoffen zu beschränken oder zu verbieten (§ 10 Abs. 1 Nr. 1 KrWG), sinnvoll sein. Dies könnten ferner z. B. Verordnungsbestimmungen sein, wonach

- CFK-haltige Abfälle nicht in Abfallverbrennungsanlagen eingesetzt und vorbehaltlich der Ergebnisse weiter Forschung nicht oder nur bei Beachtung bestimmter Maßgaben in Zementöfen energetisch verwerten werden dürfen,
- eine Verunreinigung anderer Abfallströme mit faserhaltigen Abfällen zu vermeiden ist,
- die Freisetzung von Titandioxid bei der Entsorgung von lackierten und beschichteten Rotorblättern vermieden werden muss.

Ergänzende Schadstoffgrenzwerte setzen eine fundierte Datenlage voraus. Dazu besteht Forschungsbedarf und darauf aufbauend ggfls. auch Regelungsbedarf, z. B. für lungengängige Carbonfaserfragmente mit WHO-Geometrie. Soweit zur Festlegung solcher Grenzwerte weiterer Forschungsbedarf besteht, kann der dazu erforderliche Zeitraum dadurch überbrückt werden, dass der Verordnungsgeber vorsorglich verbindlich vorschreibt, in welcher Weise die Freisetzung lungengängiger Fasern in die Umwelt und am Arbeitsplatz zu verhindern ist.

Hochwertigkeit der Rotorblattentsorgung

Der Forschungsbericht, insbesondere die Kapitel 4 bis 6 liefern Erkenntnisse, welche Verfahrenstechniken für die Zerteilung der Rotorblätter vor Ort, für die Aufbereitung der zerteilten Rotorblätter durch Zerkleinerung, Klassierung und Separierung und für die anschließende Recycling Verwertung eingesetzt werden können.

Die recherchierten Erkenntnisse führen jedoch nicht zu einer nach den Maßstäben des § 6 Abs. 2 S 2 KrWG erstellten, umfassenden Analyse der Lebenszyklusbilanz im Sinne von § 8 Abs. 1 S. 3 KrWG. Deshalb wurden technische Verfahrensalternativen bei der vergleichenden Bewertung ausgeschieden, wenn es ihnen an einem hinreichenden technischen Reifegrad fehlt, nicht aber wegen einer Verfehlung der Anforderungen des § 8 Abs. 1 S. 3 KrWG.

Empfehlungen zur Entsorgungsüberwachung

Es wird befürchtet, dass Rotorblätter auf ungeeigneten Wegen entsorgt oder als wiederverwendbar dauerhaft zwischengelagert, zur „Scheinverwertung“ exportiert und im Ausland abgelagert werden. Deshalb sollten Möglichkeiten einer noch effektiveren Überwachung geprüft werden.

Bedarf für zusätzliche, gesonderte Genehmigungs- oder Anzeigepflichten für den Rückbau oder sogar speziell für die Verwertung der Rotorblattabfälle, ergibt sich aus dem Forschungsvorhaben jedoch nicht. Auch eine Erstreckung von Nachweispflichten auf nicht gefährliche Rotorblattabfälle ist nicht erforderlich.

Betreiber von Demontage-, Aufbereitungs- und Verwertungsbetrieben, die Rotorblätter entsorgen, könnten aber ergänzend verpflichtet werden, Anforderungen zu erfüllen, die in einem untergesetzlichen Regelwerk geregelt werden. Solche Anforderungen können sich auf die Sach- und Fachkunde des Personals, auf die technische Ausstattung des Betriebs (z. B. Untergrundabdichtungen, Absaugeinrichtungen, etc.), auf Platzgrößen, Einfriedung, Eingangskontrolle, Dokumentation, etc. beziehen. Sinnvoll ist eine ergänzende Zertifizierung von Entsorgungsfachbetrieben für die Entsorgung faserhaltiger Abfälle.

Die von der LAGA empfohlenen Abfallschlüssel für faserhaltige Abfälle können sinnvoll sein. Die (isolierte) Einführung gesonderter Abfallschlüssel für Rotorblattabfälle wird hingegen eher kritisch gesehen. Bei Einführung einer Kennzeichnung, die sich auf die Verwendung von CFK und GFK erstreckt, könnte eine gesonderte Schlüsselung jedenfalls für Rotorblattabfälle verzichtbar sein, weil mit der Kennzeichnung sichergestellt ist, dass die Aufbereitungs- und Entsorgungsbetriebe den Fasergehalt der Abfälle nicht übersehen können.

Einführung von Rücknahme- und Rückgabepflichten

Rücknahme- und Rückgabepflichten sind ein erheblicher Eingriff in Grundrechte von Herstellern, Vertreibern und Betreibern von WEA.

Die Befürchtung, Anlagenbetreiber könnten keine ausreichenden Sicherheiten für die Entsorgung der Rotorblattabfälle gestellt haben, rechtfertigt keine Einführung von Rücknahmepflichten für Hersteller/Vertreiber. Der Gefahr unzureichender Sicherheitsleistungen ist ggfls. durch Nachforderungen nach § 17 BImSchG zu begegnen.

Rücknahme- und Rückgabepflichten für Rotorblattabfälle sind nur erforderlich, wenn zu befürchten ist, dass zukünftig bundesweit oder regional nicht genügend Anlagen zur Entsorgung der prognostizierten Rotorblattabfallmengen zur Verfügung stehen. Diese Gefahr dürfte weniger für die Aufbereitung (Zerkleinerung, Klassierung und Sortierung von Rotorblattabfällen) und eher für die weitere Verwertung faserhaltiger Abfälle bestehen. Rücknahmepflichten könnten ggfls. zeitlich und räumlich auch erst nach der Aufbereitung (Zerkleinerung, Klassierung und Sortierung) ansetzen, es sei denn es ist eine zu geringe Kapazität von geeigneten Aufbereitungsanlagen zu befürchten.

Rücknahmepflichten können sich an Hersteller und Vertreiber von WEA und/oder von Rotorblättern richten. Rücknahme- und Rückgabepflichten könnten sich auch auf andere faserhaltige Abfälle erstrecken; zwingend ist das aus Gründen der Gleichbehandlung nicht.

Die Einführung von Rücknahme- und Rückgabepflichten für bereits in Verkehr gebrachte Rotorblätter ist grundsätzlich mit dem Rückwirkungsverbot vereinbar. Die für die Entsorgung der Rotorblätter verantwortlichen Anlagenbetreiber sollten aber nicht aus ihrer finanziellen, durch Sicherheitsleistungen abgesicherten Kostenverantwortung entlassen werden.

Rücknahmepflichten der Hersteller/Vertreiber sollten deshalb mit einer entgeltpflichtigen Rückgabepflicht der WEA-Betreiber verbunden werden.

Anforderungen an das Produktdesign

Eine Verpflichtung der WEA-Betreiber, nach Stilllegung der WEA die Rotorblätter weiterzuverwenden, käme nur in Betracht, wenn die Rotorblätter noch für einen weiteren Einsatz in einem relevanten Zeitraum tatsächlich verwendbar sind und wenn für in diesem Sinne gebrauchte Rotorblätter ein Markt vorhanden ist oder geschaffen werden kann. Das ist eine Frage des Einzelfalls; eine abstrakt/generelle Verpflichtung dazu empfiehlt sich nicht. Der Verordnungsgeber kann jedoch gem. § 24 Nr. 1 KrWG z. B. bestimmen, dass

- Rotorblätter nur so in den Verkehr gebracht werden dürfen, dass ihre mehrfache Verwendung erleichtert wird. Das kann z. B. die Zerlegbarkeit der Rotorblätter oder die saubere Trennbarkeit von faserhaltigen Teilen der Rotorblätter betreffen,
- bei Konstruktion und Produktion von Rotorblättern der Demontage, Wiederverwendung und Verwertung umfassend Rechnung zu tragen ist,
- die Verwendung bestimmter gefährlicher Stoffe so weit wie möglich zu vermeiden ist.

Mögliche Gegenstände einer Vollzugshilfe

Die Stilllegung immissionsschutzrechtlich genehmigter WEA ist der Behörde nach § 15 Abs. 3 S. 1 BImSchG anzuzeigen. Die Behörde kann zur Sicherung einer umweltverträglichen Demontage (Bodenschutz, Gewässerschutz, Immissionsschutz, Naturschutz und die Kreislaufwirtschaft) nach § 17 Abs. 4 a S. 2 BImSchG erforderliche Anordnungen treffen. Eine untergesetzliche Regelung ist dazu grundsätzlich nicht erforderlich; hilfreich ist jedoch eine Vollzugshilfe zum Rückbau der WEA für die zuständige Behörde, die sich auch auf Empfehlungen zur Demontage der Rotorblätter erstreckt. Eine solche Vollzugshilfe kann von den gegenüber den Genehmigungs- und Überwachungsbehörden weisungsbefugten Länderbehörden verfasst werden. Das kann sich anbieten, wenn sie auf dem Wege eines Erlasses behördenintern verbindlich gemacht werden soll. Eine Vollzugshilfe kann dazu aber auch von den Bund-Länder-Arbeitsgemeinschaft Immissionsschutz und Abfall formuliert werden.

In einer Vollzugshilfe sollten Kriterien, die im Rahmen der Verkehrsanschauung für die Abfalleigenschaft von demontierten Rotorblättern sprechen, genannt und erläutert werden, um zu vermeiden, dass Rotorblätter zur Umgehung der gebotenen Entsorgung als „Schein-Ersatzteile“ gelagert oder exportiert werden.

Für das Ende der Abfalleigenschaft einzelner Fraktionen der Rotorblattabfälle sind unterschiedliche Regelwerke maßgeblich. Eine eigenständige Regelung zum Ende der Abfalleigenschaft von Rotorblattabfällen empfiehlt sich nicht. Für den Vollzug wäre eine zusammenfassende Erläuterung der Kriterien zur Bestimmung des Endes der Abfalleigenschaft im Rahmen einer Vollzugshilfe hilfreich.

In einer Vollzugshilfe sollte außerdem erläutert werden, welche Informationen Genehmigungs- und Aufsichtsbehörden mit Blick auf nach der Stilllegung der Anlage anfallende Rotorblattabfälle sie zur Entscheidung über den Genehmigungsantrag nach den §§ 20, 21 der 9. BImSchV benötigen und welche Anforderungen ergänzend dazu später an die immissionsschutzrechtliche Stilllegungsanzeige nach § 15 Abs. 3 BImSchG gestellt werden können.

Die Vollzugshilfe sollte anregen, dass die immissionsschutzrechtlich zuständige Behörde spätestens anlässlich der Stilllegungsanzeige dem Anlagenbetreiber ein konkretes Entsorgungskonzept für die Entsorgung der Anlage und insbesondere der Rotorblätter abzuverlangen.

Eine Vollzugshilfe könnte sich z. B. auch auf folgende Hinweise erstrecken:

- Vor der Erstbehandlung ist zu prüfen, ob eine Wiederverwendung von einem Rotorblatt oder einzelnen seiner Bauteile technisch möglich und wirtschaftlich zumutbar ist und insoweit ggfls. auch einer Vorbereitung zur Wiederverwendung zugeführt werden können,
- Rotorblätter sollen möglichst vor Ort zerkleinert werden, um Schwertransporte zu vermeiden, soweit sie nicht wiederverwendet oder zur Wiederverwendung vorbereitet werden,

- Bei der Zerkleinerung sind Staubemissionen zu vermeiden (z. B. durch Einhausung, Absaugung),
- Zur Transportoptimierung kann es sinnvoll sein, bereits am Standort der WEA einzelne Fraktionen voneinander zu trennen (z. B. CFK, GFK, Holz, Metall), wenn die Zusammensetzung des Rotorblatts hinreichend bekannt ist und die Trennung umweltverträglich vor Ort möglich ist.

Summary

As a result of broad political support of the energy turnaround and continued growth of the number of wind turbines in Germany and Europe, aspects of maintenance and lifetime extension, as well as wind turbine demolition and recycling gain importance.

A particular challenge is posed by the recycling of rotor blades. In addition to glass fibre-reinforced plastics (GFRP), carbon fibre-reinforced plastics (CFRP) are used in these turbine parts. Existing recycling processes for these materials have not taken root yet and need to be established on the basis of new standards, as well as tapping relevant markets for the reuse of recycled materials on a wide front. Standards for dismantling and material processing are also lacking. The detailed report “Disposal of Fibrous Waste” by the Federal/Länder Working Party on Waste Engineering (LAGA) published in 2019 highlighted this issue affecting multiple industries.

The study is based on relevant literature, expert interviews and the authors' own scientific findings. No experimental research was made for the study.

This study is the first comprehensive concept for recycling rotor blades that takes into account technical, legal and organisational aspects. The main research object was a technical and organisational concept. Another aim was to develop standards to ensure maximum quality, and at the same time a viable processing and treatment strategy for rotor blades in which all rotor blade parts are recycled to a high standard without any detrimental effects. It comprises a comprehensive, coherent concept for the maintenance, repair, dismantling, pre-shredding and processing of rotor blades. Based on envisaged waste volumes and types and the special design and composition of the different rotor blades, a coherent concept was developed, starting with on-site dismantling and processing, leading to high-quality recycling and full disposal of individual waste streams. Building on this, the organisational responsibility was assessed from a legal angle and proposals drafted. One focus consisted of reviewing any potential need for additional substantive regulations for disposal. Although the Federal Immission Control Act (BImSchG) puts the onus of responsibility on operators, specialised recycling techniques demand manufacturer know-how, which is why also elements of product responsibility of the waste management industry were reviewed and assessed for practicality.

This is a huge advance in terms of the handling of such waste, of which only a modicum of experience exists in the area of building and dismantling. Its results are a major building block in the consolidation of wind power generation; and it describes the methods and concepts of state-of-the-art fibre composite material processing.

Waste types and volumes

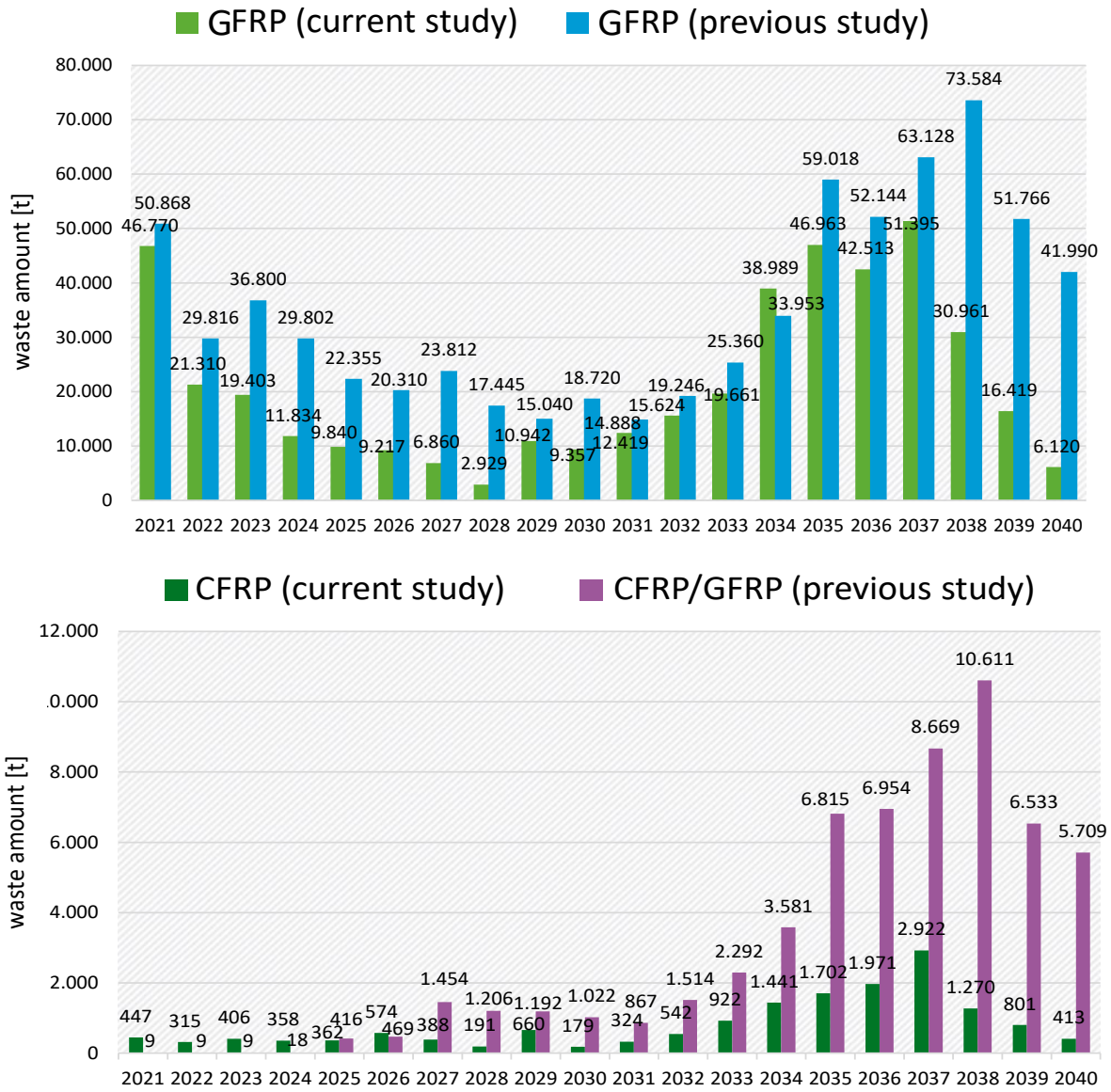
The first objective was to compile an exhaustive overview of current rotor blade designs in Germany and to estimate their material composition and the volumes issuing from the demolition and repowering of onshore/offshore wind turbines by 2040.

The core energy market data register is a suitable basis for estimating the waste generated by rotor blades. However, some missing data including in particular the rotor diameter, hub height, turbine type and turbine manufacturer as well as information on the exact material composition (main material) and masses (individual weight) of the different rotor blades are a source of current uncertainty in the assessment. In the light of this, extensive research, three calculations (regressions) and scenario analyses were conducted to estimate the expected waste volumes from wind turbine rotor blades until 2040. For the regression models, some regression functions were developed and used for Germany, which describe the relationship between the turbine blade length and weight per blade and material class (GFRP or GFRP/CFRP).

The regressions conducted reveal that by 2040 between 326,000 and 430,000 tonnes of GFRP waste will be generated from GFRP-only rotor blades in Germany. The analyses show that during the same period expected waste volumes for fibre-reinforced plastics from rotor blades containing GFRP and CFRP will amount to 77,000 to 212,000 tons. The analysis also indicates that, depending on the calculation, 11% to 32% of wind turbines in Germany have rotor blades made of CFRP/GFRP material with a CFRP content of 5% to 20%.

The annual estimated waste volumes range from 3,000 to 75,000 tonnes for GFRP and from less than 1,000 to 3,000 tonnes for CFRP. The time curve for waste volumes indicates a significant rise in both material classes at the beginning of the 2030s, which is shown in the following figure.

Comparison of the waste forecasts of the current study and the previous paper by Zotz et al. 2019; cumulative GFRP and CFRP waste volumes: (Calculation 2, GFRP and CFRP, material and performance classes).



Source: authors' chart, KIT/IIP.

The forecast of total waste volumes from rotor blades in Germany over the time period ranges between 10,000 and 75,000 tonnes annually. A parallel study by Sommer et al. (2020) corroborates these quantitative results. In addition to fibre-reinforced plastics, these waste volumes also contain metals, balsa wood and PU foam, adhesives and varnish/paints.

The geographical analysis and spread of the expected waste from rotor blades at detailed regional level (postal code areas) in Germany does not reveal any clear regional trend. However, as there are more wind turbines in North Germany, more rotor blade waste will be generated there. For the period up until 2040, the bulk of the GFRP waste at Länder level will be generated in Lower Saxony at 81,288 tonnes, in North Rhine Westphalia at 42,571 tonnes and in Schleswig-Holstein at 41,360 tonnes. In the GFRP/CFRP material class, 34,159 tonnes are expected for Brandenburg, 30,017 tonnes for Lower Saxony and 18,252 tonnes for Schleswig-Holstein by 2040. The districts of Prenzlau (Brandenburg) and Bredstedt (Schleswig-Holstein) stand out as local centres with 2,504 tonnes and 2,469 tonnes, thus exceeding cumulative GFRP waste volumes of more than 2,000 tonnes

A general approach to quantifying rotor blade waste is complicated and involves a considerable amount of effort. Uncertainties in data collection and availability further compromise the accuracy of the waste forecast, such as determining the proportion of rotor blades containing CFRP in existing plants, determining the amount of CFRP in each rotor blade, as well as missing data in the core energy market data register. Although the market data register is not maintained for the purpose of calculating waste volumes, prompt updates, the filling in of data gaps and expansion of data sets would significantly improve the quality of forecasts. Introducing a digital product passport for wind turbines or rotor blades would enable a significant quantitative and qualitative improvement in waste forecasts and in turn, due adjustment of the necessary processing and disposal capacities. In-depth product knowledge significantly eases the recycling of complex products.

Rotor blade design, maintenance and repair

Essentially, a rotor blade consists of two half shells (a top and bottom shell), which are sandwiched together at the front and rear edge using resin adhesive. The materials can be divided into three fractions:

a) fibre composites and their constituents (glass and carbon fibres, epoxy and vinyl resins),

b) metals (iron, copper, aluminium, lead) and other materials (such as electrical or electronic components)

c) foam, balsa wood, paint, coatings and so forth.

In terms of weight, fibre composites constitute the largest share amounting to at least 70%. CFRP is used increasingly in newer and larger wind turbines. Another noteworthy aspect is the use of lead, a hazardous waste product, as a balancing mass in rotor blades.

From the outset, longevity and resistance to the elements are important design criteria. Weatherproof coatings are required and the blade must be designed to preclude the common occurrence of front-edge erosion. Rotor blades require regular maintenance and inspection.

Test methods such as the ultrasound echo procedure, local resonance spectroscopy, computed laminography and heat flow thermography can be used to detect turbine blade damage. Unmanned monitoring systems can also be used to carry out inspections during operation. Onshore/offshore wind turbine rotor blades can be efficiently inspected using these automated, remote-controlled inspection systems. This also allows for predictive maintenance, which in

future can further reduce detrimental impact through the use of big data and artificial intelligence.

Rotor blade longevity can be prolonged by various types of repair work including surface treatment (e.g. Gelcoat), injection or structural repairs. The study outlines technical approaches and specific concrete measures. Operating and maintenance costs should be calculated at 20% to 25% of the electricity production costs.

Risk assessment of composite material fibres and dust

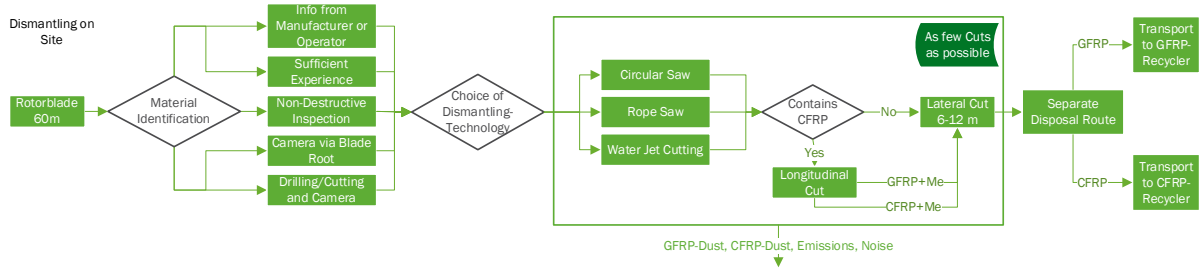
Irrespective of the material, the exposition of fibres and dust is associated with risks to humans and the environment and mainly concerns machining processes, but also shredding and recycling technologies. Toxicological issues arise with any with new and fibrous materials. This study therefore summarises the body of knowledge in this area, which is important for occupational safety and recycling technology. It includes a review of current toxicological and ecotoxicological studies concerning the evaluation of the individual substances of glass and carbon fibres, as well as an estimation of exposure scenarios during the envisaged recycling processes. The conclusion is that the units used must be equipped to prevent fibre and dust exposition. For various reasons, this waste management study does not include any proposals for threshold values.

A need for toxicological research is identified in assessing the biopersistence and effect of glass and carbon fibres in the lung, the behaviour of fibre fragments in the environment, and in determining the concentration of particles and fibres exposed in these two different process steps. The research findings highlight both what is known and not yet known in this highly complex area of human and ecotoxicology which calls for a differentiated approach. Research is also required in method development.

Technical requirements for high-quality rotor blade recycling

Dismantling, processing and recycling turbine blade waste requires technical standards and benchmarking of available technologies. This study provides such benchmarks and standards based on the current state of the art and processes. It starts with an evaluation of on-site dismantling and segmentation, which ist shown in the following figure, followed by a flow chart for factory processing and material separation, and finally a description of available recycling processes, and in the case of composite materials, recycling processes that require further development.

Flow diagram of rotor blade dismantling and the first cutting phase on-site at a wind turbine.



Source: authors' chart, Fraunhofer-ICT.

On-site pretreatment

Given the relevant container sizes, lengths of 12 or 6 metres are common when dismantling and cutting rotor blades. In principle, segmenting rotor blades should be completed in as few cuts as possible as on-site processing carries certain risks. Dust emission during cutting processes must

be avoided. Liquids should be used to bind and contain saw dust and then channelled into a waste water treatment system. Processing should take place in an enclosed environment to help improve occupational safety and reduce noise emissions.

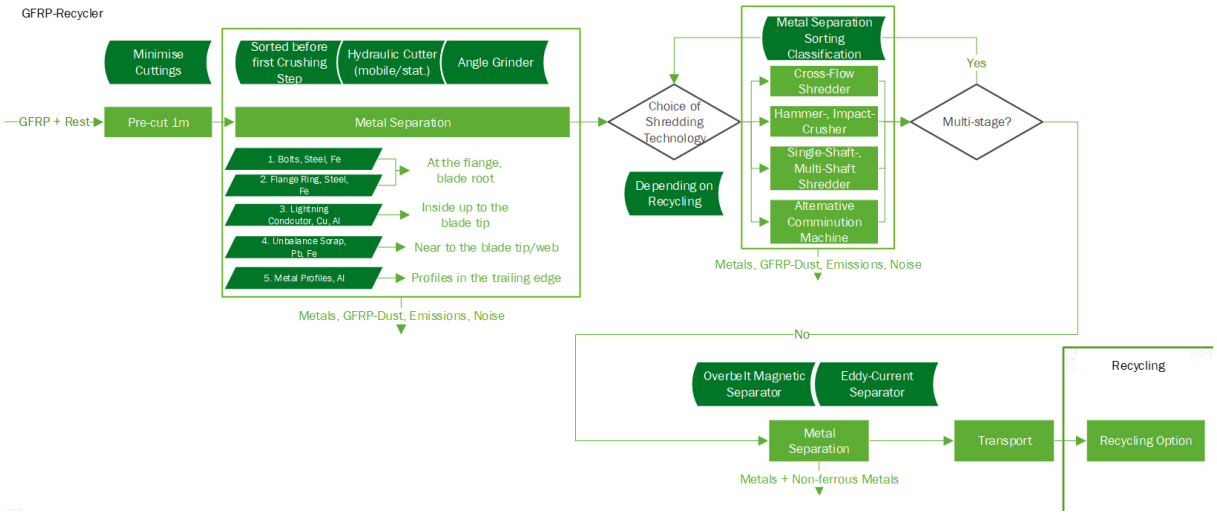
A new technology is the unmanned, closed dismantling chamber, in which the rotor blade is segmented while still mounted on the turbine. This system is controlled from the ground. Neither a crane nor additional ground protection is required. This method also reduces the risk of accidents and the environmental impact. The technology can be used onshore and offshore.

Factory processing

Further processing of the rotor blade waste is usually carried out in specialised processing plants. To ensure high-quality recycling, materials must be separated into single-constituent waste streams and any harmful substances must be avoided in further process steps. Describing the type, quantity and location of the materials in the rotor blade, possibly including dismantling instructions, would significantly improve reprocessing.

As part of the research project, a processing flow diagram was proposed for the practical and effective recycling of the key resources, which is shown in the following figure. Before shredding, the rotor blade waste must be cleared of any metallic materials and CFRP straps (if not already removed). Additional pollutant extraction might be necessary if lead was used in the construction . In general, wind turbine parts are not mechanically joined. Separation therefore requires hydraulic shears and angle grinders. GFRP and CFRP must be separated as thoroughly as possible to ensure high-quality CFRP recycling. A promising alternative comes in the shape of forced delamination of the GFRP and CFRP layers using a hydraulic wedge. Some approaches envisage the reconditioning of CFRP straps after separation for direct reuse on new products packaged in bales or bar sections. In this case, no further segmentation of the CFRP material is required.

Separation of metallic rotor blade components and selection of shredding technique.



Source: authors' chart, Fraunhofer-ICT.

The main aim of further segmentation of the rotor blade waste is to achieve fullest possible material separation. This is done by cutting the waste into approximately 1 m pieces, then cutting it into 20 cm in a first stage, and into 5 cm pieces in a second stage. In terms of overall ecological and economical optimisation, additional cutting steps seem unnecessary. In some cases, a third stage to achieve fine grinding is necessary, for instance to make fillers (particle recycling).

The cutting units were evaluated according to throughput rates, energy requirements, wear data, but also material properties (size, bulk density, volume, etc.) before and after breaking up the waste . Data on larger machines (shredders, crushers and cross flow shredders) with throughputs of more than 150 kg/h is missing, but would be required for a quantitative evaluation.

The full separation of iron and non-ferrous fractions is essential, both in the interest of high-quality material recycling and of their removal as detrimental substances in further recycling stages.

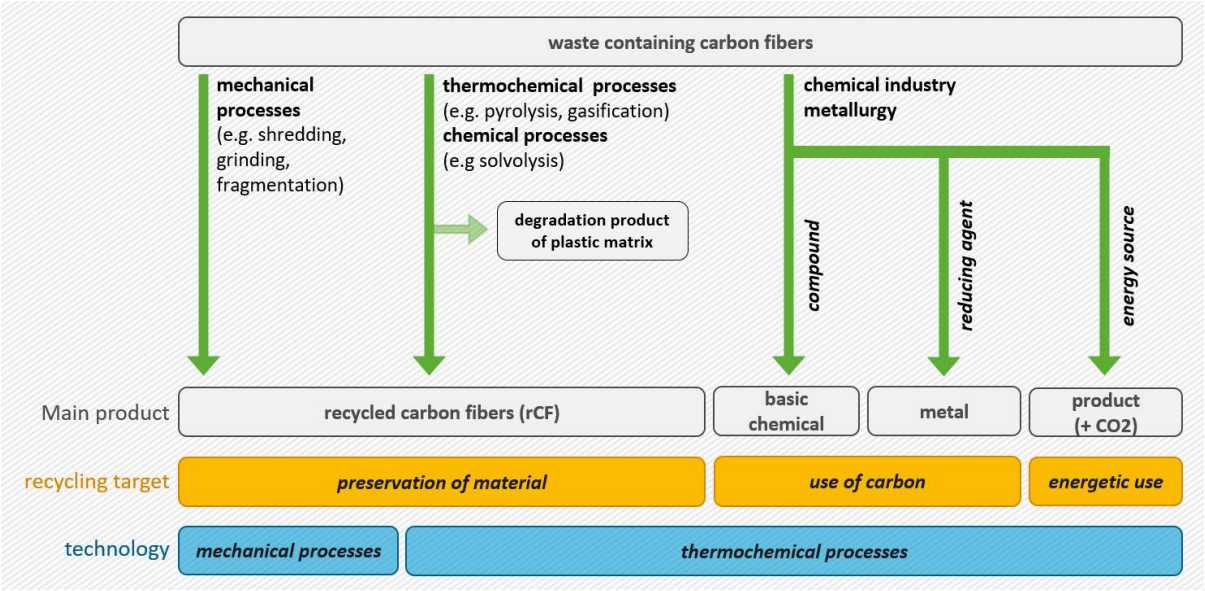
The processing requirements for rotor blade waste are largely determined by the relevant subsequent recovery and recycling processes. The available processes have been described and evaluated in depth. The process sequence offers potential for medium-term optimisation and a practicable model is proposed. A first milestone for the benchmarking of alternative methods has been set and forms the basis for further developments and technology comparisons.

Recovery and recycling

The iron and non-ferrous metals separated from the rotor blade waste are processed separately in the established metal recycling system. The requirements of these processes with regard to input material, process management, as well as the quality of recycled metals and residual material handling are well established and enable high-quality recycling.

CFRP components in rotor blades are mainly found in the longitudinal straps, which can be effectively sorted out from the turbine blade waste. If re-using the CFRP straps as new components is not practicable, the CFRP waste is currently processing via pyrolysis aimed at repurposing recycled carbon fibres. Currently there is only one pyrolysis plant in Germany with a capacity of some 1,500 t/a, therefore capacity would have to be increased in the future. Cross-sector growth in the volume of CFRP waste must be taken into account at this juncture, along with the establishment of marketable recycled carbon fibre products. Further process paths for CFRP waste are shown in the following figure.

Overview of potential process routes for the repurposing of waste containing CF including the relevant main products that are manufactured, as well as their legal and technological classification.



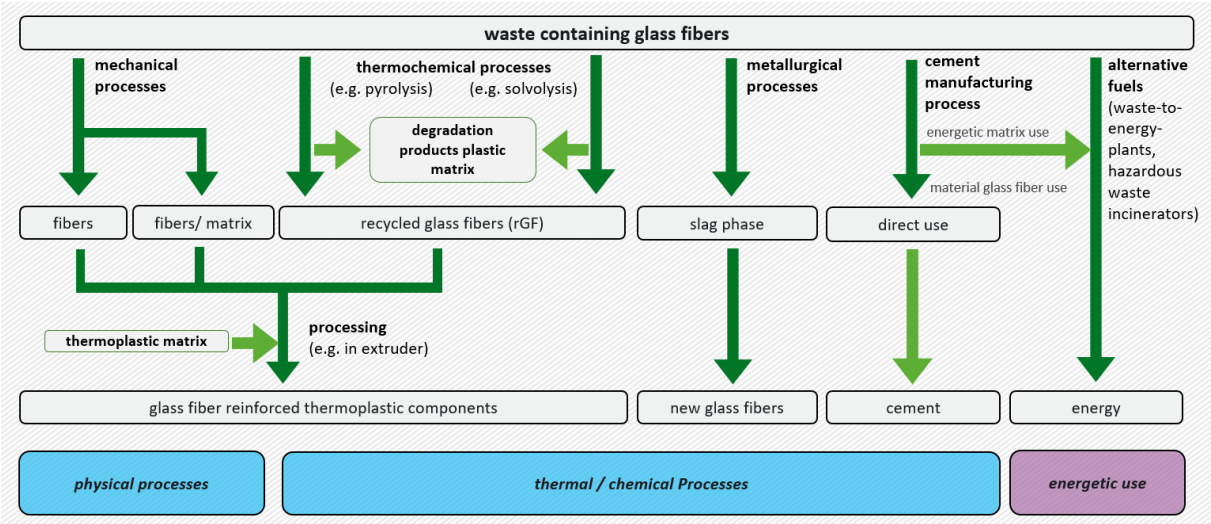
Source: authors chart, KIT-ITC, with changes after Wexler et al. (2021).

To date, GFRP recycling is not yet established in the market, this is due to economic and organisational reasons. The process paths for GFRP waste are shown in the following figure.

Specialised processing is expensive and the recyclate value is extremely low. On the other hand, the amounts of waste produced are still low. The cost-benefit ratio is therefore poor for plants operating on a continuous basis. This may change as demand rises for rotor blade processing. Waste processing not only focuses on value creation, but also on the need for proper disposal. In case of GFRP, landfills are not an option due to the high share of organic matter, and combustion processes are not suitable due to the high slag formation caused by the glass fibres. The only potentials that remain are the production of mineral materials, and pyrolysis as a means of reducing organic matter.

GFRP recycling currently focuses exclusively on cement plants, where the glass fibres are incorporated in the bricks as SiO_2 material and the matrix is used for energy purposes. The rotor blade waste is processed to suit the recycling aim, with GFRP, foam, paint and coatings, as well as balsa wood, being shredded and after processing recycled as a material mix in the cement plant. During processing, the same proportion of the material is mixed with damp paper mill residue which enhances both the heating value and also binds any dust occurring during processing.

Overview of potential process routes for the recovery of waste containing glass fibres including the relevant main products that are manufactured, as well as their legal and technological classification.



Source: authors' chart, KIT/ ITC.

Relevant research and development work should pursue technical alternatives (such as fluidised bed, HV fragmentation, solvolysis), where technology maturity is still low, so that in a future scenario GFRP recycling can become technically and economically viable.

The technical chapters of the study illustrate the need for quality assurance measures for on-site tasks and for resource-saving material separation as part of factory processing. Regulations according to Article 10 of the Federal Soil Protection Act (Bodenschutzgesetz - BBodSchG) as well as Section 10 of the Circular Economy Act (Kreislaufwirtschaftsgesetz – KrWG) provide good legal options regarding building sites. Technical standards for material recording, dismantling, on-site segmentation, processing and recycling might ensure high-quality processes with less imposition. Manufacturer responsibility under waste law is deemed rather critical and

less suitable on account of the long lifecycles, the inapplicable polluter-pays principle and of operator responsibility under immission and building law.

Organisational requirements for high-quality rotor blade recycling

Recommendations for organisational responsibility and legal parameters for proper, harmless and high-quality recycling of rotor blade waste generated during wind turbine decommissioning within the meaning of Sections 6 to 8 of the Circular Economy Act are primarily addressed to the federal government, which is authorised by the legislator under several laws to complement and substantiate existing laws by issuing regulations and executive orders. In addition, a national guideline (Vollzugshilfe) on dismantling, processing and recycling rotor blade waste can help to improve the parameters for successfully recycling rotor blade waste.

The recommendations include

- improving the information available to wind turbine operators who are primarily responsible for the disposal, and to the disposal companies whom they commission for this purpose
- spell out substantive provisions for the disposal of rotor blade waste
- improving the supervision of waste disposal
- the introduction of take-back obligations for manufacturers and distributors of wind turbines in the event that necessary disposal infrastructure is not developed in time to accommodate the proper, harmless and high-quality disposal of the predicted blade waste volumes in the coming years.

Improvement of information available to wind turbine operators

The operators responsible for disposal and the disposal companies they commission to do the job lack information relevant for disposal, including in particular on the use of fibre composite materials in rotor blades. The administration should therefore ensure that information required for the disposal of rotor blade waste is provided in the future. The basis of information can be improved by

- adding mandatory information in the market data register,
- labelling rotor blades,
- requiring manufacturers and distributors to provide information.

We recommend that the administration make the following data mandatory in the market data register:

- rotor blade weight
- material composition
- rotor blade design

An addition to the mandatory information in the market data register with information on the design and material composition of rotor blades would be covered by the legal purpose of the Energy Industry Act (Energiewirtschaftsgesetz - EnWG) and by the power to issue statutory instruments set forth in Section 111e of the Energy Industry Act (EnWG).

Manufacturer and distributor information obligations might be introduced in the shape of a cradle-to-cradle passport recommended by the German Advisory Council on the Environment (Sachverständigenrat für Umweltfragen - SRU) and the digital product passport promoted by the EU Commission and the German government, with the aim of providing permanent and easy access to information on contents, repair and recycling processes. The cradle-to-cradle passport for wind turbines and rotor blades might include the following information:

- blade weight, blade length, maximum and minimum blade circumference, position and type of attachment to the rotor, rotor diameter, rotor weight, position of centre of gravity, position of attachment points, specification of the thickest cross-section of the blade in "mm".
- manufacturer of the turbine and turbine type, manufacturer of the rotor blade and type, if specified, year of manufacture, lightning conductor yes/no, blade heater yes/no, presence of balancing weights, chamber position, balancing weight material.
- CFRP and GFRP labelling, details of fibres used (fibre type), location, type and amount of CFRP straps, location, type and amount of hybrid fibre composite structures, location, type, amount and material of balancing weights.
- Options for the processing and high-quality recycling of rotor blade waste.

Establishing detailed provisions for recycling

To complement the suggested measures it might be worthwile to issue delegated regulations to limit or prohibit the incorporation and location of waste generated in the disposal of rotor blades in products according to type, nature or ingredients (Section 10 (1) 1 of the Circular Economy Act) might be expedient. They might also take the form of administrative provisions according to which

- waste containing CFRP may not be used in waste incineration plants and, subject to the results of further research, may not be used for energy purposes in cement kilns, or only subject to adherence to certain requirements
- contamination of other waste streams by fibrous waste must be avoided
- exposition of titanium dioxide when disposing of painted and coated rotor blades must be avoided.

Additional hazardous substance thresholds depend on the availability of reliable data. Research is required in this area, and based on this, possibly also the need for regulations regarding respirable carbon fibre fragments with WHO geometry. Where further research is needed to establish such threshold values, until such values are available the legislator may prescribe as a precautionary measure how exposition of respirable fibres in the environment and at the workplace is to be prevented.

Quality of rotor blade disposal

The research report, in particular chapters 3 to 5, provides insights into the process techniques that can be used for the on-site disassembly of the blades, for the processing of the blades by segmentation, classification and separation, and for their subsequent recycling.

However, the research results do not equate with a comprehensive life cycle analysis within the meaning of Section 8 (1) 3 of the Circular Economy Act drafted according to the standards of

Section 6 (2) 2 of the Circular Economy Act. This is why alternative technical processes were excluded in the comparative assessment due to their lack of sufficient technical maturity, not because they failed to comply with requirements of Section 8 (1) 3 of the Circular Economy Act.

Recommendations for disposal monitoring

It is feared that rotor blades are disposed of in unsuitable ways or deemed reusable and put into permanent interim storage, or are exported for "sham recycling" and "parked" abroad. Possibilities of more effective supervision should therefore be explored.

However, the research project does not reveal any need for additional, separate approval or notification obligations for the demolition or even specially for the recycling of blade waste. Extending obligations to produce proofs of disposal to include non-hazardous blade waste is not necessary either.

Operators of dismantling, processing and recovery plants who dispose of rotor blades might be additionally obliged to comply with requirements set forth in delegated legislation. Such requirements could refer to the professional skills and expertise of employees, to the company's technical facilities (e.g. bottom sealing, extraction equipment, etc.), to site sizes, containment, incoming inspections, documentation, etc. Additional certification of disposal companies for handling the disposal of fibrous waste is advisable.

The waste code recommended by the Federal/Länder Working Party for Fibrous Waste (LAGA) might be useful. By contrast, the (isolated) roll-out of a separate waste code for rotor blade waste tends to be eyed critically. If labelling is introduced which covers the use of CFRP and GFRP, separate coding for rotor blade waste might be avoided in any case, because labelling will ensure that the processing and disposal companies cannot overlook the fibre content of the waste.

Introduction of take-back and return obligations

Take-back and return obligations are a significant infringement of the fundamental rights of wind turbine manufacturers, distributors and operators.

Fears that security deposits by wind turbine operators for the disposal of rotor blade waste might lack funds does not justify an introduction of take-back obligations for manufacturers/distributors. The risk of inadequate security deposits might possibly be met by additional demands in accordance with Section 17 of the Federal Immission Control Act.

Take-back and return obligations for rotor blade waste are only necessary if there is a fear that in future there will be insufficient facilities to dispose of the forecast rotor blade waste volumes at national or regional level. This risk is less likely to exist for the processing (shredding, classification and sorting of rotor blade waste) and more for the further recycling of fibrous waste. Take-back obligations might not apply temporally and geographically until after processing (shredding, classification and sorting), unless a shortfall in the capacity of suitable processing systems is to be feared.

Take-back obligations may be directed at manufacturers and distributors of wind turbines and/or rotor blades. Take-back and return obligations might also be made to cover other fibrous waste. There is no reason to do so, however, on the grounds of equal treatment.

The introduction of take-back and return obligations for rotor blades already on the market is basically compatible with the non-retroactivity principle. However, the wind turbine operators responsible for the disposal of the rotor blades should not be released from their responsibility to bear the financial cost, which is covered by their security deposits.

Manufacturer/distributor take-back obligations should therefore be linked with a chargeable return obligation on the part of the wind turbine operators.

Product design requirements

Obliging wind turbine operators to continue using the rotor blades after wind turbine decommissioning would only be considered if the rotor blades could actually continue to be used for the relevant period and if a market for such used rotor blades were to exist or could be established. This should be dealt with on a case-by-case basis and not subject of an abstract/general obligation. However, according to Section 24 (1) of the Circular Economy Act, the administration may deem that

- only rotor blades designed in such a way as to facilitate their multiple use may be put on the market. This may concern a design that allows the disassembly of the rotor blades or an effective separation of rotor blade parts containing fibres,
- full consideration must be given to dismantling, reuse and recycling in the design and production of rotor blades,
- the use of certain hazardous substances must be avoided as far as possible.

Possible objects of a national guideline (Vollzugshilfe)

The decommissioning of wind turbines approved under immission protection law must be notified to the authority in accordance with Section 15 (3) 1 of the Federal Immission Control Act (BImSchG). The authority may issue necessary instructions to ensure environmentally friendly dismantling (soil protection, water protection, immission protection, nature conservation and the circular economy) in accordance with Section 17 (4 a) 2 of the Federal Immission Control Act (BImSchG). Although delegated legislation is not required, providing the relevant authority with a national guideline for wind turbine demolition, which also includes recommendations for dismantling rotor blades, is expedient. A national guideline of this nature may be drafted by the Länder bodies empowered to instruct the licensing and supervisory authorities. A binding internal order to which the authority is subject may lend itself for this purpose. A national guideline could also be drafted by the Federal/Länder Working Party on Immission Protection and Waste.

As part of the accepted standards for the waste characteristic of dismantled rotor blades, a national guideline should define and explain criteria to prevent rotor blades being stored or exported as “sham spare parts” in an attempt to evade required disposal.

Different regulations are authoritative for end of waste of individual fractions of the rotor blade waste. A separate regulation for end of waste of rotor blade waste is not recommended. A summary of the criteria for determining end of waste status would be useful as part of a national guideline.

A national guideline should also explain what information is required by licensing and supervisory authorities regarding rotor blade waste generated after wind turbine decommissioning for them to decide on the application for permission in accordance with Sections 20 and 21 of the 9th Federal Immission Control Act (BImSchV) and what additional requirements may be imposed for the decommissioning notice in accordance with Section 15 (3) of the Federal Immission Control Act (BImSchV).

The national guideline should prompt the competent authority under immission protection law to require the wind turbine operator to furnish a detailed disposal concept for the disposal of the

wind turbine and in particular of the rotor blades, at the latest on issue of the decommissioning notice.

A national guideline might also include the following instructions:

- Prior to any dismantling operators must examine whether reuse of a blade or parts thereof is technically feasible and economically reasonable and possibly, to what extent preparation for reuse can be initiated;
- Rotor blades should be segmented on site to avoid abnormal load transport providing that they are not going to be reused or prepared for reuse,
- Dust emission must be avoided during segmentation (e.g. housing, suction),
- In order to optimise transportation, it may be expedient to separate the individual fractions (e.g. CFRP, GFRP, wood, metal) on site, if the blade composition is sufficiently known and environmentally friendly separation is possible on site.

1 Hintergrund und Zielsetzung des Forschungsvorhabens

1.1 Hintergrund

Ergebnis eines Wandels der Befürwortung einer Energiewende ist ein stetig wachsender Bestand an Windenergieanlagen (WEA) in Deutschland und Europa. Hierbei gewinnen Fragen der Wartung, Laufzeitverlängerung sowie des Anlagenrückbaus und Verwertung der dabei anfallenden Abfallströme an Bedeutung. Der Rückbau und die Verwertung von Windenergieanlagen erfolgen in Betreiberverantwortung, und für die meisten Verfahrensschritte der Hauptbestandteile von WEA gibt es umweltschonende Techniken. Gleiches gilt für die Verwertung der meisten Anlagenkomponenten, so dass deutlich mehr als 90 Gew.-% einer Windenergieanlage werkstofflich recyclingfähig sind. Bei der Aufbereitung ausgedienter Rotorblätter kann das Recycling allerdings an Grenzen stoßen und für die Aufbereitung zur Verwertung von GFK-haltigen Rotorblattabfällen gibt es aktuell in Deutschland lediglich ein verfügbares kommerzielles Verfahren. In der Vorgängerstudie zur Entwicklung eines Konzepts und Maßnahmen für einen ressourcensichernden Rückbau von Windenergieanlagen (Zotz et al. 2019) wird eine genauere Betrachtung zur Verwertung spezielle der Rotorblattabfälle empfohlen.

Diese Studie soll Verbesserungsmöglichkeiten gegenüber dem Stand der Technik und Fragen bezüglich der Organisationsverantwortung für eine langfristige Entsorgungssicherheit darlegen, wobei auch das Prinzip der Produktverantwortung für bestimmte Komponenten Berücksichtigung finden soll. Nach Stand der Technik gibt es unterschiedliche Rotorblattkonstruktionen unter Einsatz verschiedenster Materialien, welche mit ausgedienten WEA als Rotorblattabfälle auf Recyclingunternehmer zukommen. Somit besteht ein Informations- und Forschungsbedarf, um langfristig geeignete und dem Technologiewandel der Rotorblätter angepasste hochwertige Recyclingverfahren bereitzustellen.

Die meisten Rotorblätter bestehen größtenteils aus Faserverbundwerkstoffen, was bereits eine große Materialvielfalt beinhaltet. Als Matrixkomponenten sind duro-plastische Epoxidharze, Polyurethane und Vinylester verbreitet und als Faserverstärkung kommen insbesondere Glasfasern in der Ober- und Unterschale des Rotorblatts zum Einsatz. Bei sehr großen Rotorblättern, die wegen ihrer massiven mechanischen Belastung eine hohe Materialsteifigkeit benötigen, werden Carbonfasern insbesondere in sogenannten Längsgurten in neueren Rotorblättern verbaut.

Im Fußpunkt des Rotorblatts kommen zur Befestigung der Rotorblätter zur Nabe unterschiedliche Ausführungen von Metallflanschen zum Einsatz und im Rotorblatt sind weitere Metalle wie Kupfer, für Kabel und Blitzableitung und teils Bleischrot als Unwuchtausgleich verbaut.

Als sogenanntes Kernmaterial werden im Rotorblatt Balsaholz und / oder geschäumte Kunststoffe unterschiedlicher Art eingesetzt. Die Unter- und Oberschale eines Rotorblatts werden meist getrennt hergestellt und miteinander verklebt, sodass weiterhin Klebstoffe zum Einsatz kommen. Da ein Rotorblatt sehr massiven Umweltanforderungen standhalten muss, besitzen diese eine mehrlagige Beschichtung auf deren Außenseite, bestehend aus unterschiedlichen Materialien.

Dieser komplexe Materialverbund muss bei der Aufbereitung möglichst vollständig aufgelöst werden, damit die gesamte Menge des Rotorblattabfalls geeigneten hochwertigen Verwertungsprozessen zugeführt werden können.

Maßgebliche besteht ein Rotorblatt zu über 70 % aus GFK und für moderne Rotorblätter kann man im Mittel von einem CFK-Anteil von etwa 10 % ausgehen und nach derzeitigem Stand des Wissens bestehen unterschiedliche Verwertungswege für GFK und CFK.

Die Verwertungsmöglichkeit von GFK erfolgt aktuell in einer stofflich/energetischen Verwertung im Zementwerk sowie einer rein energetischen Verwertung. Diverse Verfahren der energetischen Verwertung stoßen hierbei an die Grenzen ihrer technischen Möglichkeiten, wenn beispielsweise nach dem Rückbau eines ganzen Windparks große Mengen faserverstärkter Kunststoffe anfallen. Eine auf Rotorblätter spezialisierte mechanische Vorbehandlung ist alleine aufgrund der Größe und Materialfestigkeit erforderlich. Eine direkte Deponierung von Rotorblattabfällen ist aufgrund des hohen Anteils organischer Stoffe ausgeschlossen.

Schwierigkeiten im Sinne einer hochwertigen Verwertung können entstehen wenn carbonfaserverstärkte Bestandteile in den Rotorblattabfällen enthalten sind. Diese Bestandteile sollen nach derzeitigem Kenntnisstand keinem energetischen Verwertungsverfahren zugeführt werden, da deren elektrische Leitfähigkeit und Bildung von Faserfragmenten durch thermische Belastung zu einem Risiko führen kann (Zotz et al. 2019). Aus diesem Grund sollen carbonfaserverstärkte Rotorblattteile separiert und einem spezialisierten Recycling zugeführt werden.

1.2 Zielsetzung

Die Aufgabe des Vorhabens besteht darin, eine möglichst hochwertige und gleichzeitig wirtschaftlich zumutbare Aufbereitungs- und Behandlungsstrategie von Rotorblättern zu entwickeln, bei welcher sämtliche Bestandteile eines Rotorblatts hochwertig und schadlos verwertet werden.

Weiterhin sind Empfehlungen zur Organisationsverantwortung jedes einzelnen Arbeitsschrittes zu entwickeln. Zwar legt das Bundes-Immissionsschutzgesetz eine starke Betreiberverantwortung fest, doch erfordern spezialisierte Recyclingtechniken Herstellerwissen, weshalb auch Elemente der abfallwirtschaftlichen auf Zweckmäßigkeit einer Produktverantwortung geprüft und bewertet werden sollen.

Unter Berücksichtigung dieser Randbedingungen sollen folgende Themen in dieser Studie detailliert dargelegt werden:

- Rotorblattkonstruktion und zu erwartende Abfallmengen bis 2040
- Betrachtung zur Risikobeurteilung von Fasern und Stäuben
- Baustellenseitige Abfallbehandlung
- Aufbereitung der Rotorblattabfälle
- Organisationsverantwortung.

2 Rotorblattkonstruktion und erwartete Abfallmengen

2.1 Ziel und Vorgehen

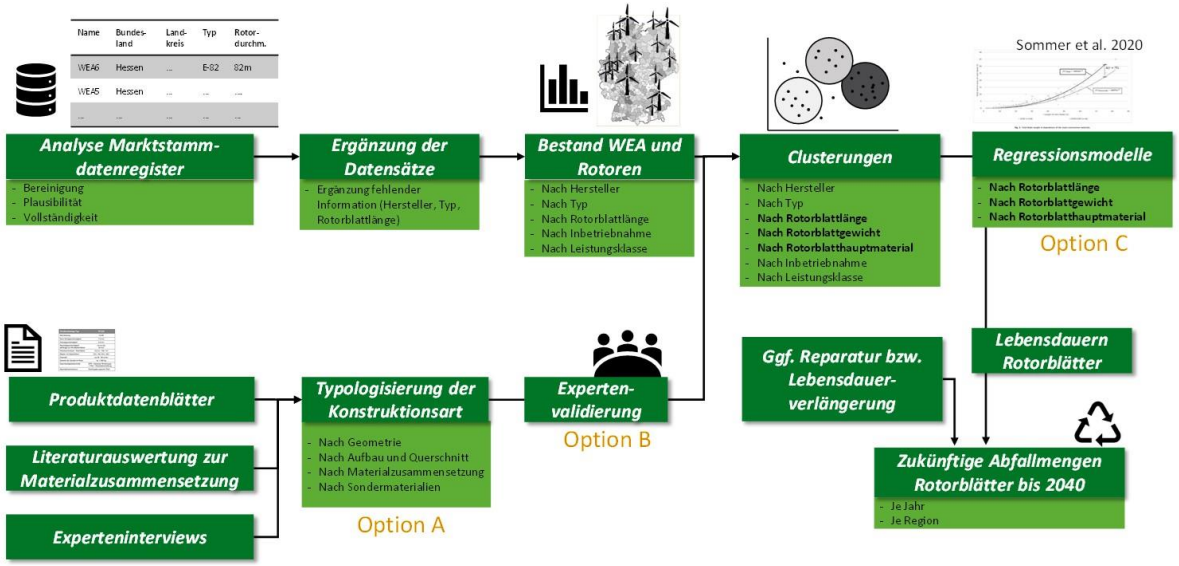
Ziel des Kapitels ist es, einen vollständigen Überblick der in Deutschland existierenden Rotorblattkonstruktionen (On- und Offshore) zu erarbeiten und deren Materialzusammensetzung und zu erwartenden Mengenströme aus dem Rückbau und des Repowerings der Windenergieanlagen (WEA) bis 2040 abzuschätzen. Dabei werden auch Schadensfälle und deren Materialaufwand berücksichtigt. Der Überblick ist strukturiert nach Rotorblatttypen und ausgewählten Materialfraktionen. Die Zusammenstellung und Bewertung erfolgen basierend auf den folgenden Kriterien: Geometrie (Länge, Umfang und Gewicht), Aufbau und Querschnitt, Materialzusammensetzung und Sondermaterialien. Relevante Quellen, die dafür ausgewertet wurden, waren insbesondere:

- Marktstammdatenregister der Bundesnetzagentur (MaStR 2020a),
- Produktdatenblätter der Hersteller,
- Strukturierte Interviews sowie informelle Gespräche mit WEA-Herstellern, Reparaturunternehmen, Rückbauunternehmen und weiteren Stakeholdern wie Verbänden und Netzwerken,
- Berichte und Statistiken des Bundesverbands WindEnergie (BWE) und der Deutschen WindGuard GmbH (Deutsche WindGuard GmbH 2021),
- Anlagendatenbanken (The Wind Power 2021),
- Studien und Prognosen des Abfallaufkommens an Altrotorblättern und
- beim Auftragnehmer vorhandene Daten von WEA (ergänzend zu den Daten des Marktstammdatenregisters).

Die verfügbaren Daten zu den Rotorblättern und zu den WEA wurden parallel erhoben und ausgewertet (Abbildung 1). Für die Rotorblätterkonstruktion wurden umfangreiche Recherchen und Auswertungen der vorhandenen Literatur und von Produktdatenblättern sowie Befragungen der WEA- und Rotorblatthersteller, von Reparaturbetrieben und Entsorgern vorgenommen (vgl. Abschnitt 2.2).

Der Anlagenbestand an WEA in Deutschland wurde analysiert, indem die Anzahl, die installierten Anlagentypen, die Hersteller, die Inbetriebnahmezeitpunkte sowie die Standorte der WEA ermittelt wurden. Dies erfolgte mittels einer Auswertung des Marktstammdatenregisters (vgl. Abschnitt 2.3).

Abbildung 1: Vorgehensweise in der Abfallaufkommensabschätzung.



Quelle: Eigene Darstellung, KIT-IIP.

Zur Berechnung der zu erwartenden Material- und Abfallströme sind beide Informationsstränge (Option A bzw. B) wieder zusammenzuführen. Da Informationen aus den Produktdatenblättern, Herstellerbefragungen und der Literatur nicht ausreichten, wurden Regressionsmodelle genutzt, um mittels Rotorblattlänge, Rotorblattgewicht und Rotorblatthauptmaterial die Menge der verbauten Materialien zu bestimmen (Option C).

Hinzu kamen Recherchen zum erwarteten Zubau von WEA bzw. Rotorblättern bis 2030 im Rahmen der Errichtung neuer Anlagen bzw. vom Repowering bestehender Standorte in Deutschland. Des Weiteren wurde vorhandene Literatur zu Lebensdauern von Rotorblättern sowie zur Häufigkeit von Schadensfällen und ihrer Reparaturfähigkeit ausgewertet. Im Anschluss daran wurden aus den Rechercheergebnissen die zu erwarteten Abfallmengen von Rotorblättern bis 2040 abgeleitet (vgl. Abschnitte 2.4 und 2.4.5).

2.2 Vorgehen und Ergebnisse zur Erhebung der Rotorblattkonstruktionen

Ziel der Studie ist es, einen vollständigen Überblick zum Aufbau bestehender Rotorblatt-Systeme in Windenergieanlagen zu erarbeiten, um die zu erwartenden Materialabfälle qualitativ und quantitativ zu bestimmen. Der Aufbau und die verwendeten Materialien spielen eine relevante Rolle in den Phasen von Demontage, Transport und Verwertung, in Bezug auf die Umwelt und gesundheitliche Aspekte.

Im Folgenden werden die Themen Aufbau, Fertigungsverfahren und Materialien dargestellt. Die verwendeten Materialien und der Aufbau eines Rotorblatts spielen eine entscheidende Rolle in Bezug auf seinen Verschleiß, auftretende Schäden und natürlich die gesamte Lebensdauer. Dies spiegelt sich in Schutzmaßnahmen gegen externe Faktoren wider, aber auch im Bereich des Monitorings (Überwachung), der Wartung und der entsprechend notwendigen Reparaturen, die während eines (fast kontinuierlichen) Betriebs von 20 bis über 30 Jahren anfallen.

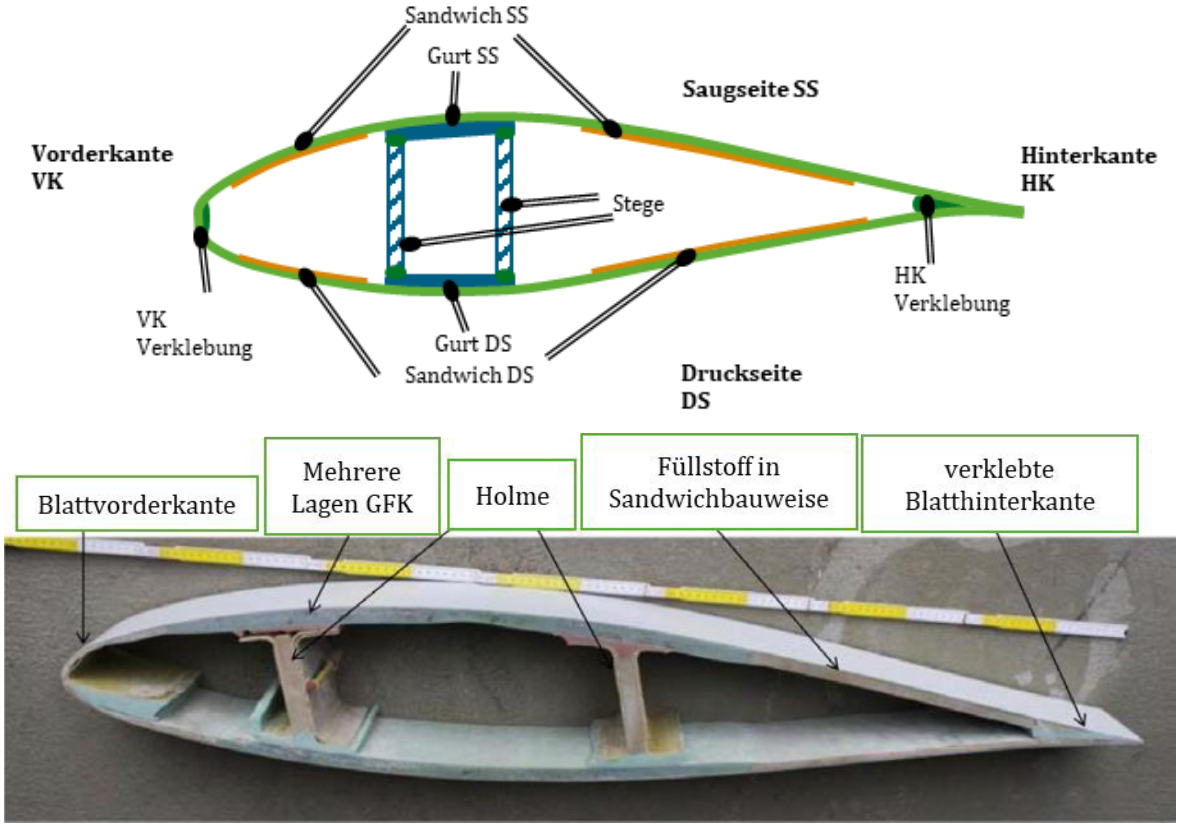
Die literaturbasierten Daten wurden mit Hilfe von in Form von Interviews geführten Telefonaten mit Windenergieanlagenherstellern ergänzt, um konkrete Informationen aus dem Feld zu gewinnen, die in der öffentlichen Literatur nicht zu finden waren.

2.2.1 Aufbau von Rotorblättern

2.2.1.1 Stand der Technik

Im Wesentlichen besteht die Form eines Rotorblatts aus zwei Halbschalen, die bei der Herstellung in Sandwichbauweise an Vorder- und Hinterkante mittels Harzkleber miteinander verklebt werden (siehe Abbildung 2) (Seiler und Teipel 2017). Als Kernwerkstoffe werden in den Unter- und Oberschalen der Rotorblätter meist Hartschäume oder Balsaholz eingesetzt. Um die Biegekräfte innerhalb des Rotorblatts aufnehmen zu können, werden zwischen den Halbschalen entweder Holmstege oder eine Holmkonstruktion eingesetzt, wie in Abbildung 3 dargestellt ist.

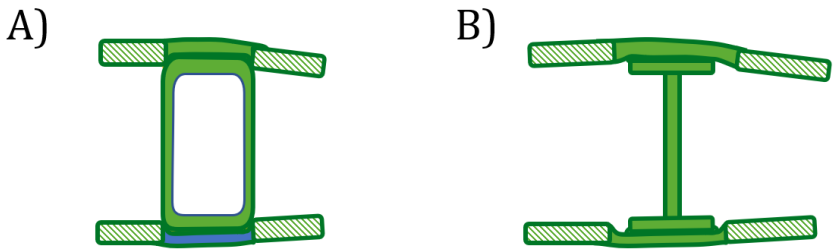
Abbildung 2: Schematischer Aufbau eines Rotorblatts.



Quelle: Eigene Darstellung, Fraunhofer-ICT, nach Seiler und Teipel (2017).

Die Verstärkungen sind auch in der Gemischtbauweise anzutreffen. Des Weiteren ist es möglich, mehrere Stege in einem Rotorblatt zu verbauen. Die Stege oder Holme bestehen aus Faserverbundkunststoffen (FVK) in einer Sandwichbauweise mit einem Kern aus Balsaholz oder Schaum. Im Herstellungsprozess wird das Versteifungselement zuerst in der unteren Schale verklebt. Anschließend wird die Oberschale auf das Element gesetzt und erneut durch Harzkleber verklebt. Zum Einsatz kommen Epoxidkleber oder Kleber auf Polyurethan-Basis.

Abbildung 3: Holmkasten A) und Holmsteg B) im Querschnitt.



Quelle: Eigene Darstellung, Fraunhofer-ICT, nach Hau (2014).

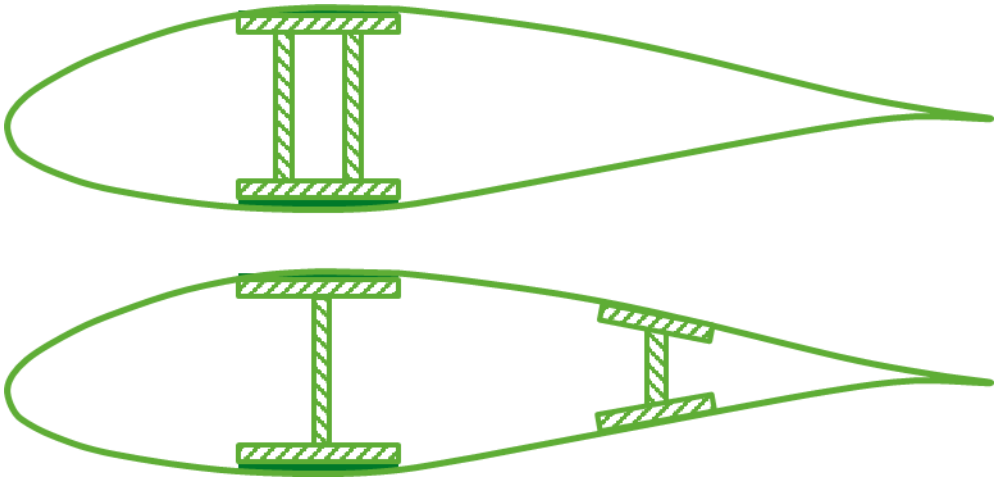
Die Holmgurte sind meist mit zusätzlichen Lagen an Glasfasern (GFK) oder Carbonfasern (CFK) in Hauptspannungsrichtung verstärkt, um so die Kräfte besser zu verteilen. CFK wird bei größeren Windenergieanlagen (WEA) vermehrt punktuell im Gurtbereich oder in den Kastenholmen/Holmstegen eingesetzt. Ein reines Rotorblatt aus CFK ist möglich, jedoch derzeit noch nicht wirtschaftlich.

Um die Schubkräfte aus der Biegebeanspruchung in Schlagrichtung aufzunehmen, werden die Holmstege als Sandwichstrukturen mit Laminat unter +/- 45°-Winkel-Faserorientierung hergestellt. Die Gurte sind unidirektionale Laminate (UD). Die zwei Varianten „Holmsteg“ oder „Holmkasten“ sind die einzigen Varianten, die als kommerzielle Produkte auf dem Markt zu finden sind. Im Folgenden werden einige neuere Strukturen dargestellt.

2.2.1.2 Neue Entwicklungen im Bereich der Rotorblätter

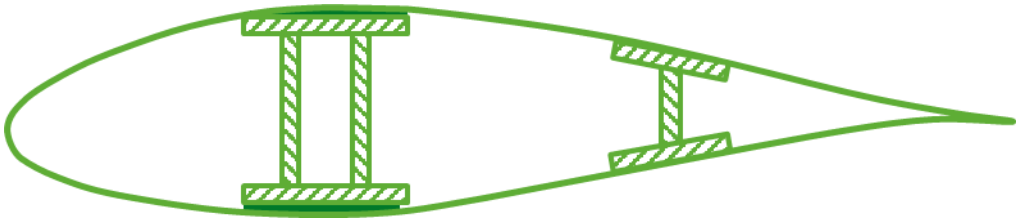
Die innere Struktur und der Aufbau der Holmstege kann sehr unterschiedlich sein und mitunter zwei oder drei Holmstege enthalten, die unterschiedlich im Rotorblatt verteilt sind. In den folgenden Abbildungen (Abbildung 4 bis Abbildung 7) (Yarbrough 2017) ist ein Rotorblatt dargestellt mit unterschiedlichen Holmklappen. Ein Rotorblatt enthält ein oberes Schalenelement mit einer auf der Innenfläche konfigurierten Holmkappe sowie ein unteres Schalenelement, ebenfalls mit einer auf der Innenfläche konfigurierten Holmkappe, und eine Scherstegbaugruppe, die sich zwischen den Holmkappen entlang der Rotorblattlänge erstreckt. Die Schersteg-Anordnung umfasst mindestens zwei Scherstege: Der erste Schersteg beginnt an einem Rotorblattfuß des Rotorblatts und erstreckt sich bis zu einer Zwischenspannstelle. Die zweite Scherbahn überlappt die erste Scherbahn an der Zwischenspannstelle und erstreckt sich bis zur Rotorblattspitze, um die Torsionssteifigkeit des Rotorblatts zu erhöhen, wie in der folgenden Abbildung 4 dargestellt. Dieses System wird für größere Rotorblätter angesetzt, um eine höhere Torsionssteifigkeit zu erreichen (Yarbrough 2017).

Abbildung 4: Querschnitt eines Rotorblatts mit zwei Homstegen.



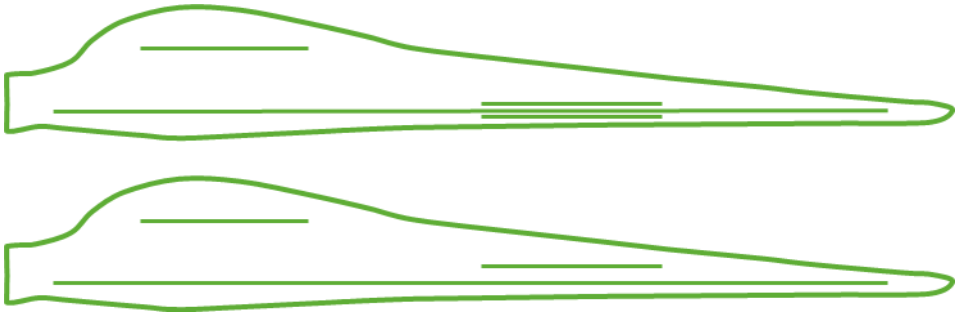
Quelle: Eigene Darstellung, Fraunhofer-ICT nach Yarbrough.

Abbildung 5: Querschnitt eines Rotorblatts mit drei Holmstegen.



Quelle: Eigene Darstellung, Fraunhofer-ICT, nach Yarbrough.

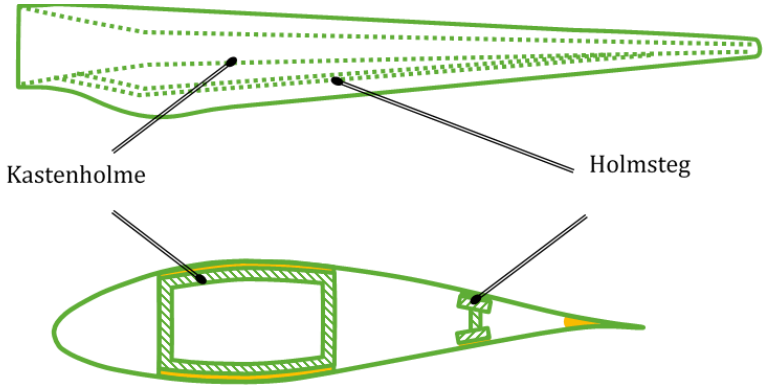
Abbildung 6: Verteilungen der Holmstege in einem Rotorblatt.



Quelle: Eigene Darstellung, Fraunhofer-ICT, nach Yarbrough.

Abbildung 7 zeigt ein Rotorblatt mit Knickaustrittskante der Firma Vestas Wind Systems (Hancock 2011). Dieses Rotorblatt weist ein Tragflächenprofil zwischen der Vorder- und der Hinterkante auf, wobei dieser Abschnitt ein Strukturelement aufweist, das das Tragflächenprofil stützt.

Abbildung 7: Patentiertes Tragflächenprofil von Vestas.



Quelle: Eigene Darstellung, Fraunhofer-ICT, nach Hancock.

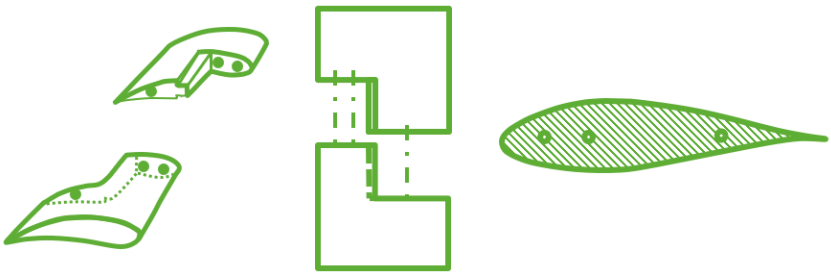
2.2.1.3 Technologie der segmentierten Rotorblätter

Bei der Kalkulation der Kosten von Windkraftanlagen muss ihre Größe, vor allem aber die der Rotorblätter, in Betracht gezogen werden. Herstellungs-, Transport- und Montagekosten nehmen bei größeren Anlagen zu. Daher sind sie bei den ansonsten ökonomischen Vorteilen größerer Anlagen miteinzurechnen. Der wirtschaftliche Vorteil einer größeren Anlage wird zum Beispiel durch die Kosten für die Vorfertigung, den Transport und die Montage großer Rotorblätter mit einer Länge von 90 m deutlich verringert (van der Bos 2011).

Heutzutage werden die immer größeren Rotorblätter oft bereits in Segmenten hergestellt. Diese können am Installationsstandort in reversibler Weise zu einem kompletten Rotorblatt zusammengesetzt werden, was zu einer Senkung der Kosten führt. Nachteile bei diesem Verfahren können durch die bislang bekannten Vorrichtungen zum Zusammenfügen der Rotorblattsegmente entstehen. Da die Rotorblattsegmente bei der Montage relativ große Bewegungen in Spannweitenrichtung zueinander ausführen müssen, führt das für einige Vorrichtungen zu Ausrichtungsproblemen. Auch birgt die Inspektion der aneinandergrenzenden Segmente nach der Montage oft Schwierigkeiten. Die Aufbringung eines Klebematerials auf bekannte Vorrichtungen kann ebenfalls problematisch sein, da Spannvorrichtungen Schwierigkeiten erzeugen können. Beispielsweise können diese während des Klebens (durch Einspritzen oder Gießen) benachbarter Rotorblattsegmente bei der Beobachtung und Inspektion auftreten. Des Weiteren wird die Demontage grundsätzlich durch die Verbindungsvorrichtungen erschwert, sodass einzelne Rotorblattsegmente nicht direkt entfernt werden können, um sie instand zu setzen, zu untersuchen, oder auszutauschen (van der Bos 2011).

Abbildung 8 zeigt eine patentierte Rotorblattverbindung für eine Anlage von General Electric Co.

Abbildung 8: Rotorblattverbindung für eine WEA.



Quelle: Eigene Darstellung, Fraunhofer-ICT, nach van der Bos.

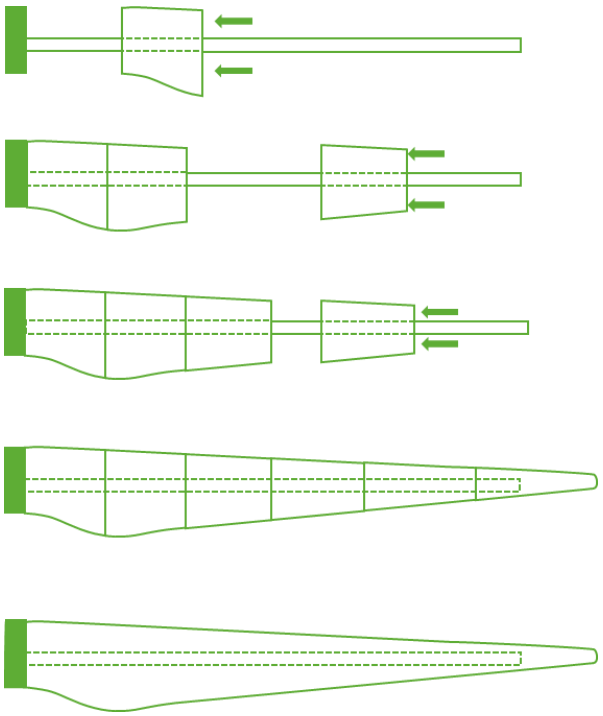
Im Folgenden ist ein patentiertes System der Firma Vestas Wind Systems A/S dargestellt.

Abbildung 9: Segmentiertes Rotorblatt (patentiertes System der Fa. Vestas Wind Systems A/S).

Quelle: Eigene Darstellung, Fraunhofer-ICT, nach Hancock.

Die folgende Grafik zeigt die Verbindungsanordnung für ein Rotorblatt mit angeflanschten Segmenten.

Abbildung 10: Verbindungsanordnung für ein Rotorblatt mit angeflanschten Segmenten.



Quelle: Eigene Darstellung, Fraunhofer-ICT, nach Judge.

2.2.1.4 Wurzelring und Verbindungselemente zur Nabe

Bei einem Rotorblatt können mehrere Teile unterschieden werden; der Wurzelabschnitt und der aerodynamische Abschnitt. Der Wurzelabschnitt ist der Teil des Rotorblatts, der mit der Turbine verbunden ist. Er ist rohrförmig mit kreisförmiger Form, wie in der vorherigen Abbildung dargestellt. Als Verbundwerkstoff wird für diesen Blatt-Abschnitt ein dickes unidirektionales Glasfaserlaminat verwendet.

Die Verbindung zwischen dem Rotorblatt und der Nabe ist sehr wichtig, um die Lebensdauer zu verbessern und den Demontageprozess von Rotorblättern bei der Stilllegung zu optimieren. Derzeit gibt es drei verschiedene Konzepte zur Realisierung einer modernen Rotorblatt-Nabe-Verbindung mit Stahl-Elementen (Hechler 2019): Querbolzenanschluss („IKEA“ - Anschluss) (Abbildung 11), eingeklebter Leichtbauflansch (Abbildung 12) und einlaminierte Hülsen Eine Alternative zur Querbolzenanschluss-Verbindung wurde von der Fa. Vestas entwickelt: die eingeklebte Verbindung, auch "leichter Flansch" genannt. Abbildung 11 zeigt einen Flanschen

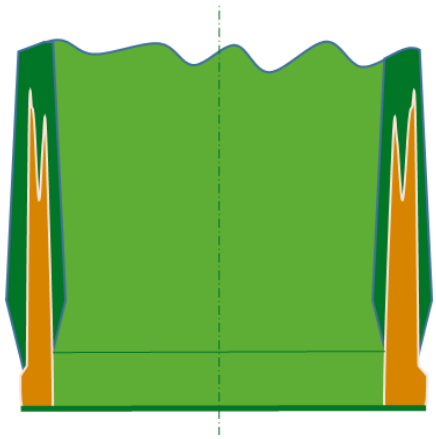
aus hochfestem Aluminium, der in die Struktur des Blattfußes eingeklebt wurde. Ein weiterer Typ ist die "einlaminierte Hülsen"-Verbindung, entworfen von der Firma LM Wind Power. Die metallischen Hülsen, die in die Blattwurzel eingeklebt werden, dienen als "Ankerplatte" zur Befestigung des Blattes an der Narbe. Hierfür werden hochfeste Schrauben verwendet, die in die Platte geschraubt werden (Hechler 2019).

Abbildung 11: Querbolzenanschluss („IKEA“ - Anschluss).

Quelle: Fraunhofer-IWES.

Eine Verbindungsart ist die "Querbolzenanschluss"-Verbindung (Abbildung 11). Diese technische Entwicklung war ein großer Schritt zur Gewichtsreduktion des Rotorblatts bei gleichzeitiger Senkung der Herstellungskosten. Früher für Hubschrauberblätter verwendet, hat diese Verbindungsart inzwischen Eingang in die kommerzielle Rotorblattanbindung für Windenergieanlagen gefunden. Es gibt nur eine Einschränkung, da Polyestermaterialien zu plastischer Verformung neigen, wenn hohe Belastungen an dem Rotorblatt anliegen: Dann muss das Blatt aus Epoxidharz-Verbundwerkstoffen hergestellt werden. Da ein bekannter Hersteller von Selbstbaumöbeln eine fast identische Verbindungstechnik verwendet, wird diese Verbindung als "Querriegel"-Typ bzw. manchmal auch als "IKEA Anschluss" bezeichnet.

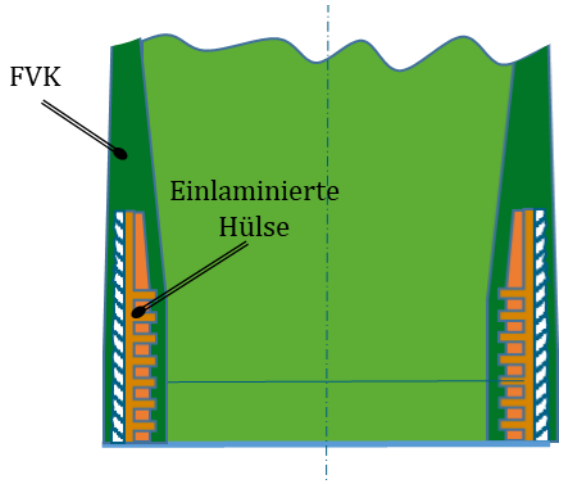
Abbildung 12: Eingeklebter Leichtbauflansch.



Quelle: Eigene Darstellung, Fraunhofer-ICT, nach Hechler (2019).

Eine Alternative zur Querbolzenanschluss-Verbindung wurde von der Fa. Vestas entwickelt: die eingeklebte Verbindung, auch "leichter Flansch" genannt. Abbildung 12 zeigt einen Flanschen aus hochfestem Aluminium, der in die Struktur des Blattfußes eingeklebt wurde. Ein weiterer Typ ist die "einlaminierte Hülsen"-Verbindung (siehe Abbildung 13), entworfen von der Firma LM Wind Power. Die metallischen Hülsen, die in die Blattwurzel eingeklebt werden, dienen als "Ankerplatte" zur Befestigung des Blattes an der Narbe. Hierfür werden hochfeste Schrauben verwendet, die in die Platte geschraubt werden (Hechler 2019).

Abbildung 13: Einlaminierte Hülsen.



Quelle: Eigene Darstellung, Fraunhofer-ICT, nach Hechler (2019).

Eine der einfachsten „Blatt-Nabe“-Verbindungsarten ist die "eingeklebte Bolzen"-Verbindung. Da die Schrauben hierfür direkt in die Struktur des Blattfußes integriert wurden, kann mit diesem Ansatz ein hohes Maß an Gewichtsreduktion erreicht werden (Hau 2014). Gleichzeitig wird diese Art der Verbindung aber auch als risikoreich bewertet. Verbesserungen in Bezug auf Stärke und Zuverlässigkeit geben Anlass zur Hoffnung, dass diese Verbindungsart für eine verlässliche Massenproduktion verwendet werden kann.

2.2.1.5 Zusätzliche Elemente in einem Rotorblatt

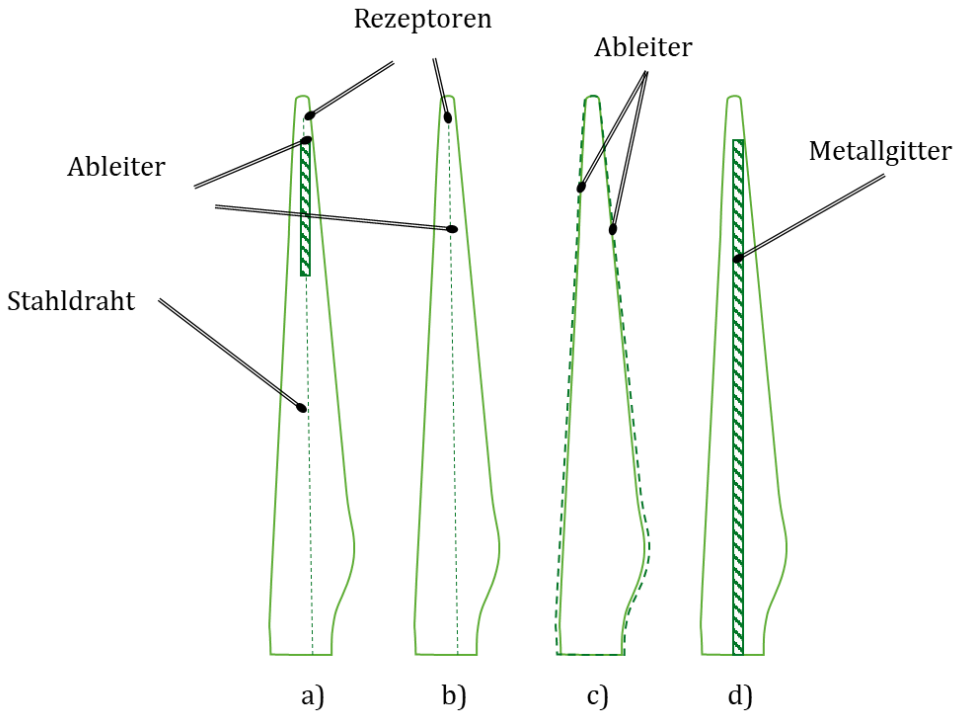
2.2.1.5.1 Blitzschutzsystem

Bei einem Blitzeinschlag in die Rotorblätter ist in den meisten Fällen der Bereich der Blattspitze betroffen. Daraus resultieren erhebliche Beschädigungen. Im praktischen Betrieb zeigte sich, dass die anfängliche Vermutung, man könne bei Rotorblättern aus nichtleitendem Glasfaserverbundmaterial auf ein Blitzschutzsystem verzichten, sich nicht bestätigen ließ. Insbesondere Versicherer forderten daher einen wirksamen Blitzschutz; nicht zuletzt aufgrund der steigenden Zahlen und Größe der Windenergieanlagen.

Im Bereich der Blattspitze sind zum Blitzschutz ein oder mehrere eingeschraubte und somit leicht austauschbare Metallteile angebracht. Diese sogenannten Rezeptoren fungieren als Blitzschutzsystem. Die Funktion des Blitzableiters übernimmt hierbei ein dicker metallischer Draht, der im Inneren des Rotorblatts verläuft und an der Blattwurzel endet, wo er mit dem Erdungssystem der Windenergieanlage leitend verbunden ist.

In Abbildung 14 sind verschiedene Blitzableitersysteme gezeigt.

Abbildung 14: Blitzschutzmethoden für Rotorblätter. IEC 1864/02.



Quelle: Eigene Darstellung, Fraunhofer-ICT, nach Hechler (2019) und Kjærside Storm (2013b).

2.2.1.5.2 Enteisungssysteme

Eiswarn- und Enteisungssysteme werden bei Windenergieanlagenherstellern als Option angeboten. Eiswarnsysteme bieten die Möglichkeit, die Anlage abzuschalten, falls das Wetter eine Gefahr für das System werden könnte. Enteisungssysteme (auf Englisch „De-Icing“) ermöglichen es, die Blätter vom Eis zu befreien. Die zwei Systeme, die eingesetzt werden, basieren auf in der Vorderkannte eingebetteten elektrischen Widerstandheizungen oder alternativ auf elektrisch beheizter Luft, die in den inneren Teil des Rotorblatts geblasen wird.

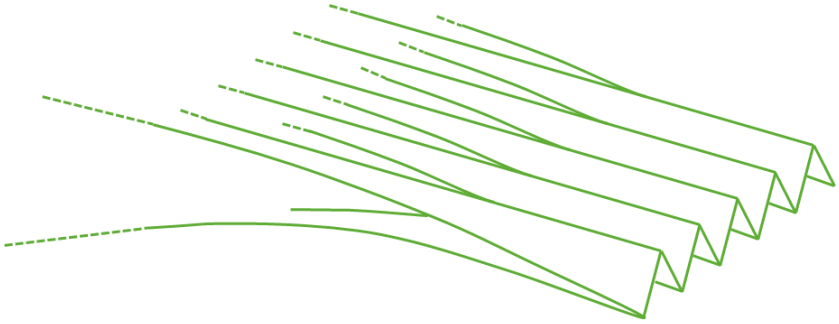
2.2.1.5.3 Gezackte Hinterkante („Serrated Trailing Edge“)

Obwohl die Windenergie eine der am schnellsten wachsenden Quellen erneuerbarer Energie ist, stellt der Lärm der WEA immer noch ein großes Hindernis für die Umsetzung dar. Bei großen, modernen Windturbinen gilt der aerodynamische Lärm als die dominierende Quelle dieses Lärmproblems, insbesondere der sogenannte "Hinterkantenlärm", der durch die Wechselwirkung von Turbulenzen in der Grenzschicht mit der Rotorblatthinterkante verursacht wird. Eine aktive Maßnahme zur Geräuschminderung stellt die gezackte Hinterkante dar (Abbildung 15, Abbildung 16 und Abbildung 17) , die aus Aluminium, Kunststoff oder Faserverbundkunststoffen besteht (Koegler et al. 2007).

Abbildung 15: Gezackte Hinterkante (Serrated Trailing Edge).

Quelle: Eigene Darstellung, Fraunhofer-ICT, nach (2011).

Abbildung 16: „Serrated Trailing Edge“ im Detail.



Quelle: Eigene Darstellung, Fraunhofer-ICT, nach Obrecht und Steingrimsson.

Abbildung 17: „Serrated Trailing Edge“ im Detail.

Quelle: Eigene Darstellung, Fraunhofer-ICT, nach Zamora.

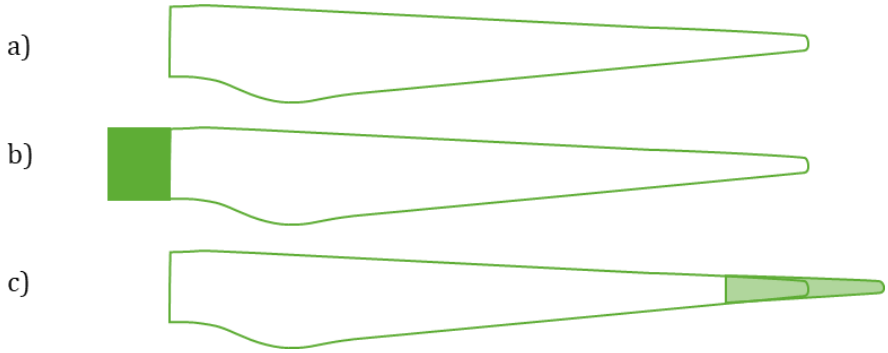
2.2.1.5.4 Extender

Die generierte Energie ist direkt abhängig von der überstrichenen Fläche des Rotors. Eine Verlängerung des Rotorblatts und entsprechend des Rotordurchmessers entspricht einer Steigerung der generierten elektrischen Leistung.

Beispielsweise entspricht eine Verlängerung von 1 m des Rotorblatts auf 56 m Durchmesser, einer Steigerung von 7,6% der Rotorfläche und ebenfalls einer vergleichbaren Leistung der Anlage (EnergieKontor).

Die Recherche hat zwei unterschiedliche Modelle von Extender ergeben; an der Wurzel (Aarhus 2009) des Rotorblatts oder an der Spitze (EnergieKontor) wie in Abbildung 18 dargestellt.

Abbildung 18: Extender des Rotorblatts an der Wurzel und an der Spitze (EnergieKontor).



Quelle: Eigene Darstellung, Fraunhofer-ICT.

2.2.2 Fertigungsverfahren

In der Literatur werden meistens drei generelle Herstellungsverfahren betrachtet (AVK - Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe e. V. (AVK) 2013), die im Folgenden eingehender betrachtet werden:

- Vakuuminfusionsverfahren (VARTM)

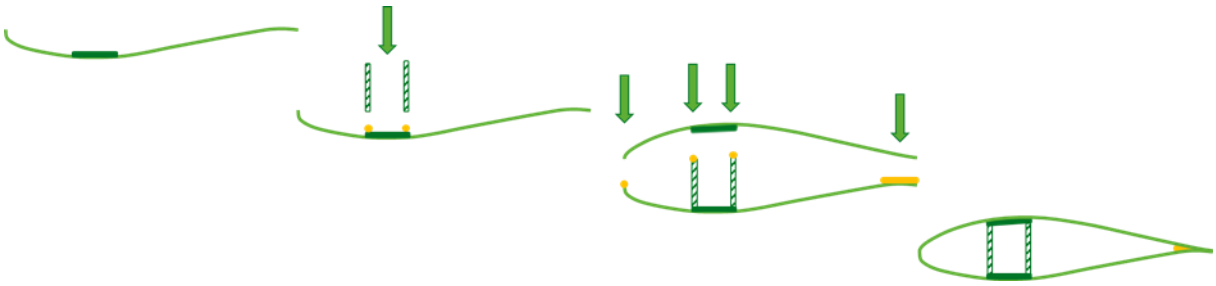
- Prepreg (mit vorimprägnierter Verstärkungsfaser)
- Handlaminierung „Hand lay-up“.

2.2.2.1 Vakuuminfusionsverfahren (VARTM = Vacuum Assisted Resin Transfer Molding)

Das Vakuum-Infusionsverfahren ist das am häufigsten genutzte Verfahren zur Herstellung von Rotorblättern. Es besteht aus folgenden Phasen (AVK - Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe e. V. (AVK) 2013), die in Abbildung 19 schematisch dargestellt sind:

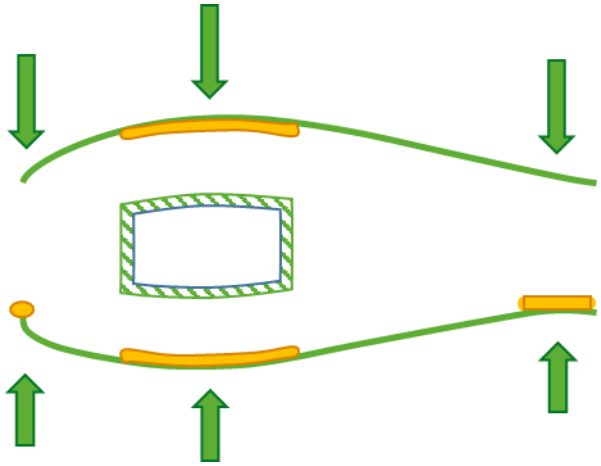
- Bereitstellung einer Halbschalenform für das Rotorblattbauteil
- Einlegen eines Fasermaterials in die Form
- Umschließung der Form mit einer Vakuumhülle
- Erzeugung eines Unterdrucks in der Form und Infundierung eines flüssigen Kunststoffmaterials
- nach Aushärtung des flüssigen Kunststoffmaterials wird das hergestellte Rotorblattbauteil der Form entnommen
- die zwei Halbschalen werden getrennt voneinander hergestellt
- danach werden Holmstege und Kastenholme aus FVK-Material in der unteren Schale fixiert
- Verklebung beider Halbschalen zu einem Rotorblatt.

Abbildung 19: Fertigung des Rotorblatts mit Holmgurten.



Quelle: Eigene Darstellung, Fraunhofer-ICT, nach Kempf (2016).

Abbildung 20: Fertigung des Rotorblatts mit einem Kastenholm.

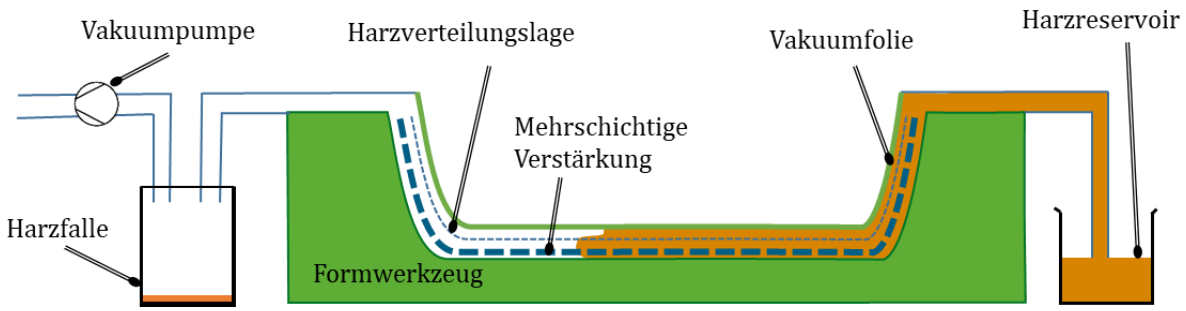


Quelle: Eigene Darstellung, Fraunhofer-ICT, nach Kempf (2016).

Derartige Vakuuminfusionsverfahren werden zur Herstellung von Windenergieanlagen-Bauteilen routinemäßig eingesetzt und erlauben die Herstellung auch großer Bauteile mit komplexen Geometrien. Durch den optimalen Einsatz geeigneter Fasermaterialien entstehen hoch belastbare Bauteile. Allerdings ist es insbesondere bei sehr großen Bauteilen schwierig, dieses Verfahren mit der erforderlichen Präzision auszuführen, um in jedem Einzelfall ein optimales Bauteil zu erhalten. Beispielsweise kann es in der Praxis zu Lufteinschlüssen oder sogenannten „Harznestern" kommen, was aufwendige Nacharbeiten erforderlich oder das Bauteil im schlimmsten Fall sogar unbrauchbar macht. Außerdem ist es insbesondere bei großen Bauteilen und komplexen Bauteilgeometrien schwierig, überall den gewünschten Faservolumengehalt einzuhalten (Austinat und Malischewski 2012).

Diese Kontrolle während der Prozessherstellung erfolgt über zerstörungsfreie Prüfungen wie z. B. Ultraschall, Akustik, Optische Kohärenz-Tomographie, Optische Thermographie, Mikrowellen-Thermographie oder Röntgen-Analyse. Diese Verfahren werden in den folgenden Kapiteln näher beschrieben.

Abbildung 21: Vakuuminfusionsverfahren.

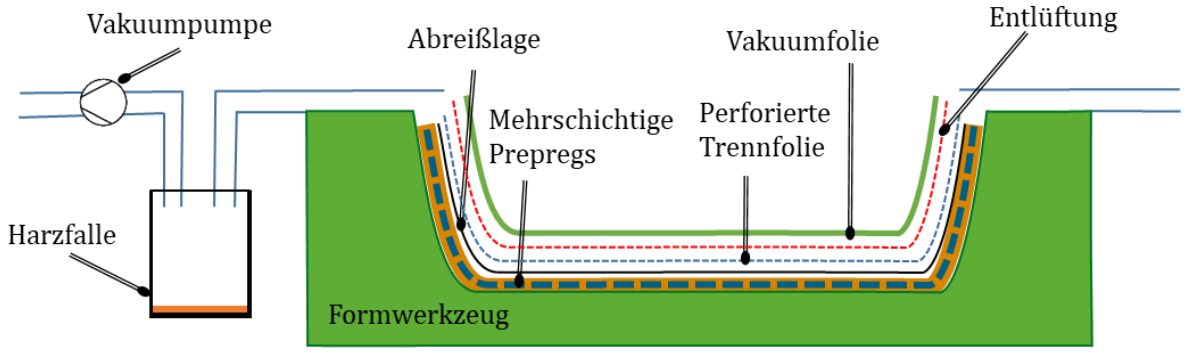


Quelle: Eigene Darstellung, Fraunhofer-ICT, nach Hau (2014).

2.2.2.2 Prepreg-Prozess

In einigen Fällen wurde das Problem der effizienten Benetzung von Kohlenstofffasern bei der Vakuuminfusion beobachtet, was zur Verwendung einer teureren Prepreg-Technologie für die Herstellung von Verbundwerkstoffen auf Kohlenstofffaserbasis führte (Mishnaevsky et al. 2017). Die Prepreg-Technologie wird benutzt, wenn Windblätter aus unterschiedlichen Verstärkungsfasern entstehen sollen. Prepregs sind ein Halbzeug, welches aus Epoxidharz und vorimprägnierter Verstärkungsfaser (z. B. Carbonfaser) besteht. Während des Vakuumierens härten die eingelegten Prepreg-Elemente vollständig in der Rotorblatthälfte aus. Die Firma Vestas benutzt dieses Verfahren bei Systemen mit Kastenholmen.

Abbildung 22: Prepreg-Verfahren.

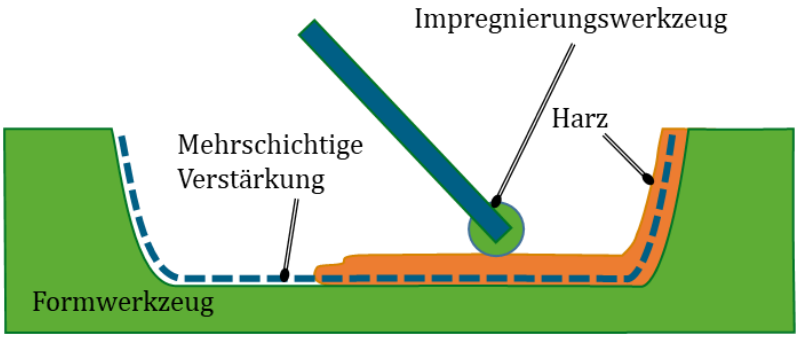


Quelle: Eigene Darstellung, Fraunhofer-ICT, nach Hau (2014).

2.2.2.3 Handlaminierung “Hand lay-up” / “wet lay-up”

Die Handlaminierung (engl. Hand lay-up) ist ein altes Verfahren, das noch immer für kurze Rotorblätter benutzt wird. Die Fasermatten werden mit Hand imprägniert und in die Form gelegt. Die großen Hersteller haben wegen dem enormen Aufwandes dieser Handarbeit und der erhaltenen personalabhängigen Qualität des Produkts dieses Verfahren zu Gunsten höher automatisierter Techniken verlassen. Nachteilig in diesem Prozess ist der deutlich geringere Faservolumenanteil gegenüber dem Harzanteil.

Abbildung 23: Handlaminierung (Wet Lay-up Verfahren).

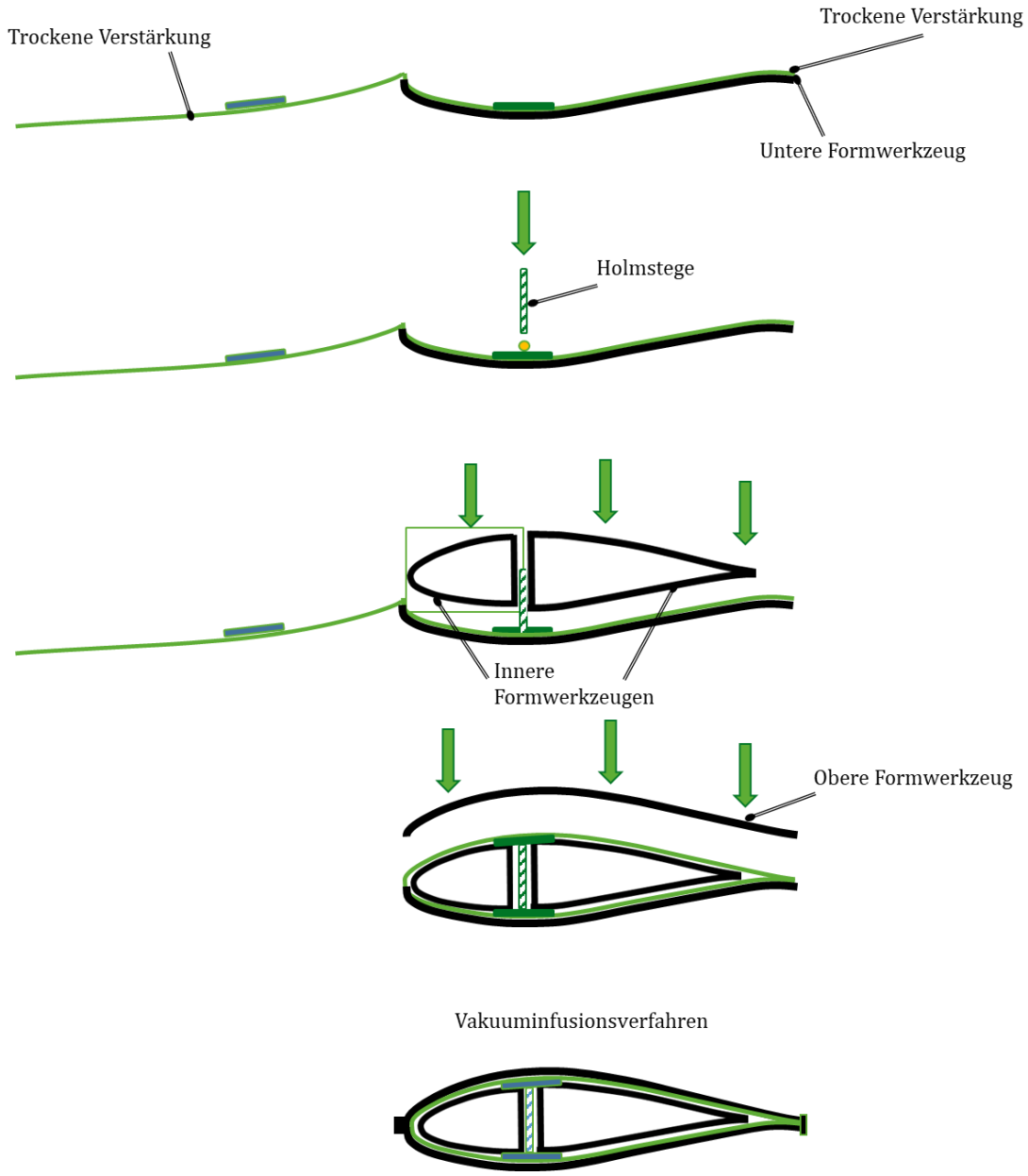


Quelle: Eigene Darstellung, Fraunhofer-ICT, nach Hau (2014).

2.2.2.4 Sonderverfahren: Vakuuminfusionsverfahren VARTM – Integral-Blade von Siemens

Das Integralblade-Verfahren ist von Siemens entwickelt worden und basiert auf dem VARTM Verfahren (engl. Vacuum Assisted Resin Transfer Molding). Die Hauptidee dabei ist, das Windblatt in einem einzigen Teil herzustellen (Abbildung 24). Das Verfahren produziert das Rotorblatt in einem einzelnen geschlossenen Prozess. Die von Siemens dargestellten Vorteile sind unter anderem, dass beim Integralblade-Verfahren kein Kleber benutzt wird (da keine zwei Schalen verbunden werden müssen). Die Verbindung zwischen den zwei Schalen ist eine potentielle Schwachstelle der Standardverfahren. Dadurch sind bei den Integralblades die Vorder- und die Hinterkante fester und stabiler. Außerdem wird prozesstechnisch weniger Raum für die Herstellung benötigt und Zeit eingespart. Zum Schluss wird außerdem weniger Personal benötigt, weil das Integralblade in einem einzigen geschlossenen Verfahren hergestellt wird (Burchardt et al. 2008). Die Technologie besteht im Wesentlichen aus einer Presse, in der sich eine weitere Form (die den Kern darstellt) befindet.

Abbildung 24: Vakuuminfusionsverfahren VARTM – Integral-Blade von Siemens.



Quelle: Eigene Darstellung, Fraunhofer-ICT.

2.2.3 Materialien

Die Rotorblätter bestehen in der Regel zu zwei Dritteln (bezogen auf die Masse) aus faserverstärkten Kunststoffen FVK (Goodship 2010). Diese setzen sich aus verstärkenden Fasern und der einbettenden Kunststoffmatrix (zumeist Epoxidharz) zusammen. Durch das höhere Elastizitätsmodul der Fasern gegenüber dem Kunststoff wird die Festigkeit des Verbundes erhöht. Dieser Verbund macht es erst möglich, große Belastungen im Rotorblatt aufzunehmen. Für die Produktion immer größerer Rotorblätter werden auch Carbonfasern als Verstärkung für die Kunststoffmatrix eingesetzt, da Carbonfasern bei geringerem Gewicht bessere Materialeigenschaften als Glasfasern aufweisen. Eingesetzte FVK enthalten bezüglich ihrer Masse 60 bis 70 % Verstärkungsfasern und 30 bis 40 % Harz. Es hat sich gezeigt, dass für Rotorblattlängen von weniger als 50 m überwiegend glasfaserverstärkte Epoxid-/Polyesterharze eingesetzt werden; eine eindeutige Materialtendenz beim Kernmaterial in den

Sandwichverbünden ist nicht zu erkennen. Rotorblätter mit Längen von mehr als 50 m werden häufig in Hybridbauweise aus Carbon- und Glasfasern, Epoxidharz und überwiegend Balsaholz als Kernmaterial im Sandwichbereich hergestellt. Balsa (von spanisch balsa = Floß) ist ein leichtes, korkartiges Holz (botanische Familie der Ochroma-Arten (Bombacaceae)) aus den Regenwaldgebieten des tropischen Mittel- und Südamerikas. Es ist ein schnell wachsender Baum, der bereits in fünf Jahren einen Durchmesser von 30 cm erreicht bei einer Dichte von 0,05 bis 0,3 g/cm³. Im Folgenden werden weitere Konstruktionswerkstoffe dargestellt, die in einem Rotorblatt laut der Literatur zu finden sind.

2.2.3.1 Kunststoffharze

Als Matrixharze werden duroplastische Kunststoffharze in Rotorblättern eingesetzt. Dabei wird unterschieden zwischen ungesättigten Polyesterharzen (UP), Vinylesterharzen (VE) sowie Epoxidharzen (EP) (Schaffarczyk 2012).

Die Schwierigkeit bei einem späteren Recycling von Duroplasten besteht darin, dass sie nicht wieder aufschmelzbar sind, da es sich um engmaschig dreidimensional vernetzte Verbünde von Makromolekülen handelt. EP-Harze haben im Vergleich zu den UP-Harzen bessere mechanische Eigenschaften und weisen eine bessere Reproduzierbarkeit, bezogen auf die mechanischen Eigenschaften, auf. Der Vorteil von UP-Harzen jedoch ist die Aushärtung bei Raumtemperatur, die die Verarbeitung vereinfacht. EP-Harze hingegen müssen mit zusätzlichen Werkzeugen für eine vollständige Aushärtung erhitzt werden. Wesentlicher Nachteil bei UP-Harzen ist eine stärkere Schrumpfung während der Aushärtung von bis zu 8% (Hau 2014).

Ein Vergleich zwischen den unterschiedlichen Harzsystemen ist in folgender Tabelle 1 dargestellt:

Tabelle 1: Eigenschaften von duroplastischen Harzsystemen.

Eigenschaft	Einheit	Polyester	Vinylester	Epoxid
Dichte	g/cm³	1,12–1,25	1,13	1,17–1,25
Zugfestigkeit	MPa	55	72	80
E-Modul	GPa	3,5–4,7	3,4–3,5	2,7–3,9
Bruchdehnung	%	2,1	7	6–8
Kosten	€/kg	3–5	8–12	4–13

Quelle: Eigene Zusammenstellung, Fraunhofer-ICT, nach Seiler und Teipel (2018).

Ein weiterer Grund für die Verwendung von Kunststoffharzen ist der Oberflächenschutz. Ein Rotorblatt muss 20 Jahre extremen Wetterbedingungen wie Winderosion, Starkregen, Schnee, Eis und Hagel standhalten. Als zusätzlicher Oberflächenschutz kommen Hartlacke, meistens Zweikomponentenkleber, zum Einsatz, sogenannte Gelcoats. Dabei handelt es sich um mit Kieselsäure angedickte Kunstharze, meistens ungesättigte Polyester- oder Epoxidharze. Durch die Kieselsäure wird die Oberfläche deutlich abriebfester als das unbeschichtete Faserverbund-Formteil.

Als nachhaltigen Ansatz für eine bessere Recyclingfähigkeit der Rotorblätter gibt es bereits Ansätze zur Verwendung recycelfähiger Polyurethan-Harze (PU) (plasticker 2016). Somit besteht die Möglichkeit eines einfacheren Recyclings durch Umschmelzen oder mittels chemischer Solvolyse der Harzmatrix.

2.2.3.2 Verstärkungsfasern

Die Steifigkeit und Festigkeit innerhalb des Laminats ist abhängig von den verwendeten Faserarten. Überwiegend kommen Glas- und Carbonfasern als Endlosfasern (Rowings) in Rotorblättern zum Einsatz. Ein Vergleich der verschiedenen Fasertypen ist in Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 2: Mechanische Eigenschaften unterschiedlicher Fasertypen.

Eigenschaft	Einheit	E-Glas	Carbonfaser HM	Basalt	Aramid1
Dichte	g/cm³	2,55	1,76	2,8	1,44
Zugfestigkeit	MPa	3100–3800	3950	bis 4840	3000
E-Modul	GPa	73	238	89	72–130
Bruchdehnung	%	3,5	1,7	3,15	2,7

1ARAMID = aromatische Polyamide.

Quelle: Eigene Zusammenstellung, Fraunhofer-ICT, nach Witten und Mathes (2020) und Pico und Steinmann (2016)

Tabelle 2 zeigt, dass Carbonfasern den Vorteil eines größeren E-Moduls bei geringerer Dichte aufweisen. Jedoch sind Carbonfasern etwa 12-mal so teuer wie günstige Glasfasern, weshalb heutige Rotorblätter hauptsächlich noch aus glasfaserverstärkten Kunststoffen hergestellt werden. Aber besonders bei Rotorblättern größer als 40 m werden vermehrt Carbonfasern im Gurtbereich verbaut, um die Schubbelastungen besser zu verteilen. Als weiterer Diskussionspunkt ist die Vernetzbarkeit zwischen Faser und Harz unterschiedlich: Carbonfasern sind aufgrund der geringeren Packungsdichte schwerer zu vernetzen, wobei es unterschiedliche Carbonfaser- als auch Glasfasertypen gibt.

In Tabelle 3 sind die mechanischen Eigenschaften unterschiedlicher Glasfasertypen dargestellt. AR-Glas ist zum Beispiel besonders alkalibeständig, hat aber einen höheren Preis im Vergleich zum herkömmlichen E-Glas. In Rotorblättern sind meistens Fasern aus E-Glas sowie hochmodulare Carbonfasern (HM) verbaut (Witten und Mathes 2020; Schaffarczyk 2012). In den letzten Jahren hat die ECR-Glasfaser aufgrund einer besseren Steifigkeit Teile der E-Glasfasern auf dem Markt ersetzt. Andere Fasersorten werden wegen eines schlechten Preis-Leistungs-Verhältnisses in den Rotorblättern nicht eingesetzt.

Tabelle 3: Mechanische Eigenschaften unterschiedlicher Glasfasertypen.

Glasfaser-Typen	E	ECR	AR	S	Quarz
Eigenschaften	Mehrzweck	Säurebeständig	Alkalibeständig	Hohe Festigkeit	Gute thermische Eig.
Dichte in g/cm³	2,55	2,62	2,68	2,49	2,15
E-Modul in GPa	72	80	72	88–91	69
Zugfestigkeit in GPa	3,1–3,8	3,1	1,7	4,4–4,6	3,4

Quelle: Eigene Zusammenstellung, Fraunhofer-ICT, nach Witten und Mathes (2020), Pico und Steinmann (2016) und Pico et al. (2012)

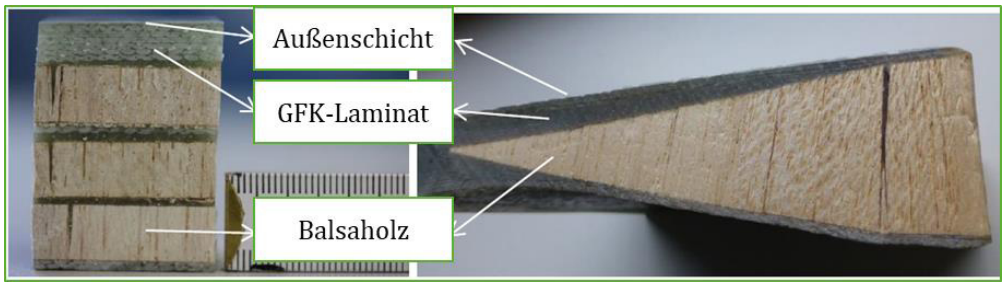
2.2.3.3 Sandwichmaterialien

Die Sandwichbauweise hat den Vorteil, die Biegesteifigkeit eines Bauteils bei gleichzeitiger Gewichtseinsparung zu erhöhen. Bei dieser Bauweise sind die leichten Kernwerkstoffe allseitig von mehreren Schichten FVK-Laminaten umschlossen. Die typischerweise unter 45° gedrehten Deckschichten bestehen entweder aus GFK- oder CFK-Material und sind nur wenige Millimeter dick. Als Kernwerkstoffe in Rotorblättern werden in der Regel Balsa-Hirnholz und/oder hochfeste Schaumstoffe eingesetzt. Wabenstrukturen kommen wegen des hohen Preises und der geringen Druckfestigkeit bei Rotorblättern nicht zum Einsatz (Schaffarczyk 2012).

2.2.3.3.1 Mehrfachsandwichbauweise

Bei der Mehrfachsandwichbauweise werden Kernwerkstoffe in mehreren Schichten zwischen Laminatschichten eingebaut, um eine noch höhere Steifigkeit im Vergleich zur einfachen Sandwichbauweise zu erhalten. Die folgende Abbildung zeigt ein Rotorblattstück in Mehrfachsandwichbauweise im Querschnitt.

Abbildung 25: Rotorblattstück in der Mehrfachsandwichbauweise (links) und in Einfachbauweise (rechts) aus Balsaholz (*Ochroma Lagopus*).



Quelle: Eigene Darstellung, Fraunhofer-ICT.

Balsaholz gehört (wie bereits erwähnt) zu den leichtesten Hölzern weltweit mit Dichtevariationen von 60 kg/m^3 (schnellwachsendes Plantagenholz) bis 380 kg/m^3, das aus urspr. Tropenwäldern stammt. Die geringe Dichte des Balsaholzes resultiert aus der hohen Wachstumsrate, bei der der Baumradius durchaus bis zu 12 cm pro Jahr zunehmen kann. Nach 10 Jahren erreicht der Baum eine Höhe von bis zu 25 m. Somit ist der Balsabaum der am schnellsten wachsende Baum weltweit (Funke 2001)seiler.

Neben der geringen Dichte bietet das Balsaholz auch eine gute Elastizität und Dämmung. Durch diese Eigenschaften findet es seinen vielseitigen Einsatz. Derzeit werden mehr als 90% des weltweit geernteten Balsaholzes in WEA verbaut, der Rest verteilt sich auf Yacht- und Modellbau. In Rotorblättern kann Balsaholz entweder verstärkt im Stegbereich verbaut oder über die gesamten Halbschalen der Rotorblätter verteilt sein. Balsaholz in Rotorblättern bietet ein großes, bisher ungenutztes Potential für eine Weiterverwendung als sekundärer Rohstoff (Seiler und Teipel 2018).

2.2.3.3.2 Schaumstoff

In der Herstellung innerer Bauteile werden Kunststoffe unterschiedlicher Art aufgeschäumt und zu Platten verarbeitet. Generell werden in Rotorblättern PVC-, PMI-, PET- oder PUR-Schäume eingesetzt. Die Vorteile von Schaumstoffen bestehen zum Teil in ihrer noch geringeren Dichte als Balsaholz (Schaffarczyk 2012). Neuere Schaumkunststoffe (Fa. Mau und Mittelmann) aus der Klasse der Styrol-Acrylnitril-Copolymere (SAN) können auch als Kernwerkstoffe eingesetzt werden.

2.2.3.4 Coating / Beschichtung

Bei der Entscheidung, welche Coatingmaterialien zu bevorzugen sind, ist es wichtig, die Bedingungen zu berücksichtigen, denen das Rotorblatt der Windenergeanlage ausgesetzt sein wird und die Kompatibilität der Coatings mit den Laminaten, die diese beschützen sollen (Kjærside Storm 2013b).

Die Oberflächen der Rotorblätter von Windenergieanlagen sind verschiedenen Arten von ungünstigen externen Bedingungen ausgesetzt:

- Temperatur (von -50 ° C bis 70 ° C)
- UV-Strahlung durch Sonnenlicht
- chemischen Angriffen (durch verschiedene Chemikalien)
- Blut von Insekten
- Fäkalien von Vögeln
- Blitzschlag und anderen mechanischen Angriffen
- Eis
- Wasserangriff
- Hagelstürmen
- Regenerosion
- Salzgehalt in der Luft
- Abnutzung durch Sand und andere kleine Partikel.

Lacke und Coatings sollen die Rotorblätter so weit wie möglich gegen diese Einflüsse schützen. Es ist nicht möglich, Rotorblätter vor all diesen externen Bedrohungen zu schützen, aber sie sollten so hergestellt werden, dass die Oberflächenschicht – der Gelcoat oder der Lack – den höchstmöglichen Schutz bietet. Gelcoat wird bei der Herstellung eines Rotorblatts als oberste Schicht hergestellt: Es wird in die Form gegeben, dann werden die Fasern, der Schaum, und zuletzt das Harz hinzugefügt. Lacke, sofern sie verwendet werden, werden nach der Herstellung des Rotorblatts aufgetragen, wobei die Dicke einer Lackeschicht normalerweise viel geringer als die einer Gelcoat-Schicht ist. Die Oberfläche sollte nicht zu glänzend sein, da sie das Sonnenlicht reflektiert, allerdings auch nicht zu rau, da dies zu Ineffizienzen führt (Kjærside Storm 2013a).

Sowohl Lacke als auch Gelcoats können aus verschiedenen Polymertypen hergestellt werden. In den meisten Fällen wird das Laminat aus glas- oder kohlefaserverstärkten Polymeren hergestellt. Die Matrizen können aus verschiedenen Typen bestehen, in den meisten Fällen handelt es sich jedoch um ungesättigte Polyester, Epoxide oder gelegentlich um Polyurethane oder Vinylester. Wenn die Oberflächenschicht ein Gelcoat ist, wird sie aus einem Polymer hergestellt, das mit dem Laminat kompatibel ist. Handelt es sich bei der Deckschicht um einen Lack, sollte dieser die Oberfläche des Laminats benetzen können. Die Kompatibilität oder die Benetzungsfähigkeit sind notwendig, um eine ausreichende Haftung der Deckschicht auf dem Laminat zu gewährleisten (Kjærside Storm 2013b).

Heute beträgt die Schichtdicke des Gelcoats bis zu 800 µm, aber es kann große Unterschiede geben, abhängig von den Materialien, die zur Herstellung des Gelcoats verwendet werden.

Farben werden in geringeren Mengen auf die Schaufeloberflächen aufgetragen als Gelcoats. Einer der Gründe für die Verwendung von Lacken anstelle von Gelcoats ist, dass sie dünnere Schutzschichten bieten. Je dünner die Oberflächenschicht ist, desto besser die chemische und mechanische Beständigkeit. Bei Lacken wird die Schutzschicht normalerweise weniger als 200 µm betragen. Die Wahl des Herstellers zwischen Gelcoat und Lacke hängt von der Art der Produktion ab. Im Falle einer Reparatur wird es normalerweise ein Lack sein, der auf die Oberfläche aufgetragen wird (Kjærside Storm 2013b).

Die meisten angesetzten Lacke und Coatings sind ungesättigte Polyester, Epoxidharz, Acrylate und Polyurethane. In Tabelle 4 sind die Vorteile und Nachteile der unterschiedlich eingesetzten Coatings dargestellt (Kjærside Storm 2013b).

Tabelle 4: Vorteile und Nachteile von Gelcoats- und Lack- Materialien für Rotorblätter.

Material	Vorteile	Nachteile
Polyester (UPE)	Kostengünstig, kann auf RT aushärten	Niedrige chem. Beständigkeit. Lange (vollständige) Aushärtungszeit
Epoxid Harz	Gute chem. Beständigkeit Harte Oberfläche	Aushärtung bei höheren Temperaturen Lange Aushärtungszeit
Acrylate	Auf Raumtemperatur kurze Aushärtungszeit UV-beständig	Spröde Niedrige chem. Beständigkeit IR oder UV Quelle ist notwendig um auszuhärten.
PUR	Bei Raumtemperatur kurze Aushärtungszeit Harte Oberfläche, gute Erosionsbeständigkeit, UV-Beständigkeit, auch als Tape	harte Oberfläche höhere UV-Beständigkeit als Epoxidharz

Quelle: Eigene Zusammenstellung, Fraunhofer-ICT, nach Kjærside Storm (2013b).

Im Vergleich zu anderen De-Icing Systemen (Kapitel 2.2.5.5) werden alternative Lösungen untersucht, die auf Oberflächenbehandlung basiert sind.

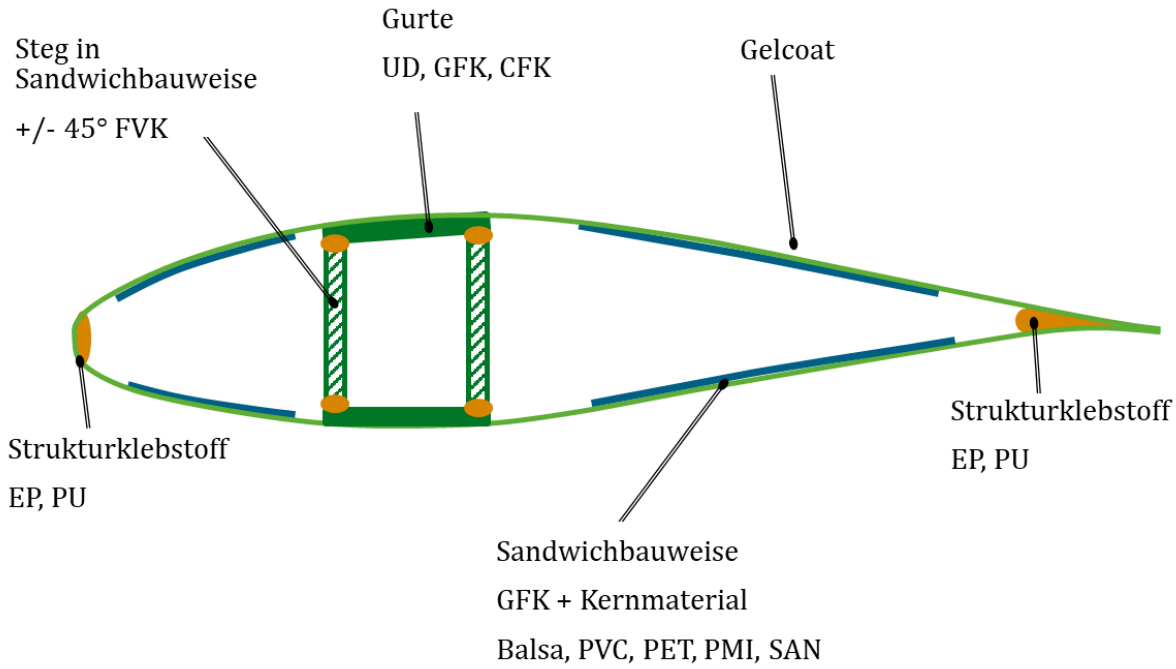
Das Department of Electrical and Computer Engineering, University of Virginia, hat einen Anti-Icing Lack für Epoxidharzoberflächen durch eine Sprühbeschichtung mit Polytetrafluorethylen (PTFE; allgemein bekannt als Teflon) Nanopartikeln entwickelt. Die Teflonpartikel haben einen mittleren Durchmesser von 300 nm. Die Eisablösungsstärke bei einer Temperatur von -10 °C und 16 % relativer Luftfeuchtigkeit betrug im Durchschnitt etwa 30 kPa, was etwa 20 % der Eishaftungsstärke von einfachem Epoxid entspricht (Qin et al. 2020).

Gamesa hat Nanomaterialien verwendet, um ein System zu entwickeln, das nicht nur die Eisbildung verhindert, sondern auch die Erosionsschutzleistung verbessert. Das Lack-System Bladeshield wurde in Kooperation mit VTT entwickelt (Whitlock 2014).

Weitere Entwicklungen wurden mit super Hydrophobisierungen durchgeführt (Qin et al. 2020; Xu et al. 2018).

2.2.3.5 Zusammensetzungen von Rotorblättern (einzelne Beispiele aus der Literatur oder Produktdatenblättern)

Abbildung 26: Schematischer Aufbau eines Rotorblatts mit eingesetzten Materialien.



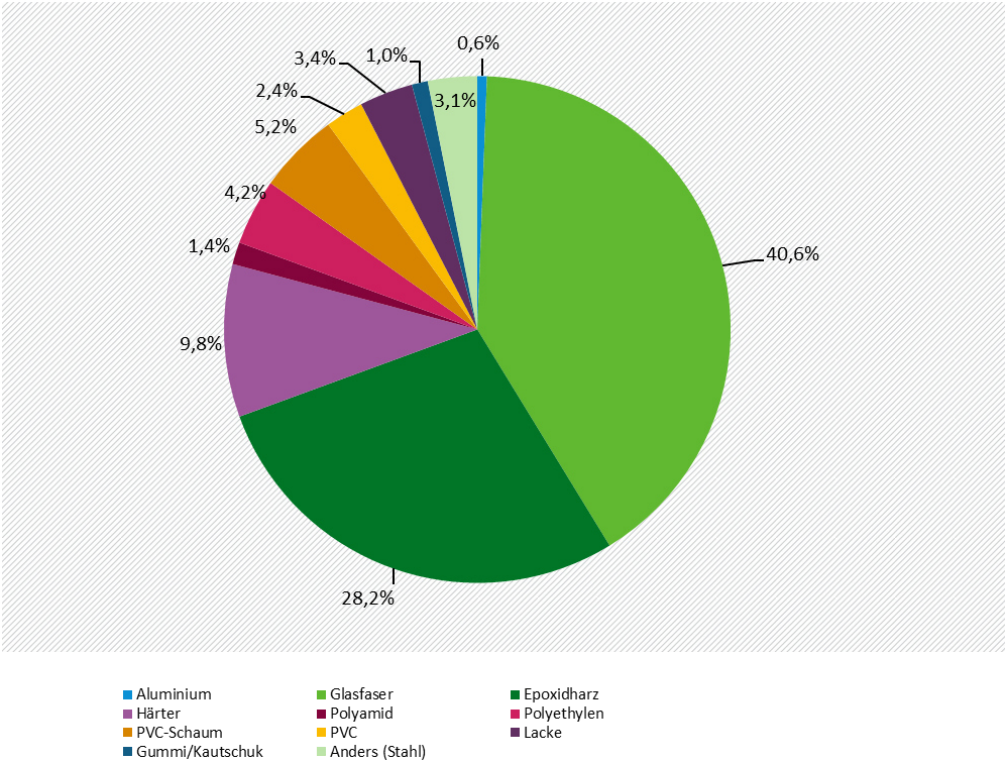
Quelle: Eigene Darstellung, Fraunhofer-ICT.

Tabelle 5: Zusammenfassung der Werkstoffe, die in Rotorblättern verbaut sind (aus Kapitel 2.2.3).

Verstärkungsfaser	Matrix	Sandwich Teil	Kleber	Lacke Coating	Metalle
Glas (meisten E- und ECR-)	Epoxy	Balsaholz	Epoxy	UPE	Kupfer
Carbon	Polyester	PVC Schaum	PUR	PUR	Aluminium
	Vinylester	PMI Schaum			Stahl
	Polyurethane	PET Schaum			
	Thermoplasten	PUR Schaum			

Quelle: Eigene Zusammenstellung, Fraunhofer-ICT.

Abbildung 27: Enercon E-66 Wind Turbine Gewichtsverteilung [%].



Quelle: Darstellung nach Ozoemena et al. (2018).

Tabelle 6: Enercon E-66 Wind Turbine.

Material	[kg]
Aluminium	33
Glasfaser	2188
Epoxidharz	1516
Härter	525
Polyamid	76
Polyethylen	228
PVC-Schaum	279
PVC-Schaum	131
Lacke	184
Gummi/Kautschuk	55
Anders (Stahl)	169

Quelle: Zusammenstellung nach Ozoemena et al. (2018).

Einige weitere Beispiele aus der Literatur:

Tabelle 7: Beispiele für Geometrien und Gewicht.

Hersteller	Model	Rotorblattlänge (Meter)	Rotorblatt-Gesamtgewicht (Tonnen)	Gewicht 3 Rotorblätter (Tonnen)	Blatt Gewicht (Tonnen)
GAMESA	G83 2MW	40,5	40,5	21,9	7,3
GAMESA	G87 2MW	42,5	45	17,75	5,92
GAMESA	G90 2MW	44	38,5	15,14	5,05
GAMESA	G114 2MW	56	64,19	22,69	7,56
GE Energy	GE70,5 1,5MW	35	32,7	11,3	3,77
GE Energy	GE100 2,5MW	49	47,3	22,56	7,52
GE Energy	GE77 1,5MW	37,5	31	13,56	4,52
GE Energy	GE82,5 1,5MW	40,3	35,77	18,95	6,32
SIEMENS	SWT93 2,3MW	45	54,5	19,8	6,6
SIEMENS	SWT101 2,3MW	49	56,36	20,36	6,79
SIEMENS	SWT108 3MW	53	54	21,5	7,17
SIEMENS	SWT120 3,6MW	58,5	100	32,4	10,8
SENVION	MM82 2,05MW	40	38	21	7
SENVION	MM92 2,05MW	45,2	43	24	8
SENVION	MM100 2MW	48,9	46	27	9
SENVION	MM122 3MW	59,8	70	45	15
SENVION	MM114 3,2MW	55,8	70	45	15
SENVION	MM104 3,4MW	50,8	59	36	12
NORWIN	STALL29 0,225MW	14	5,3	2,3	0,76
NORWIN	ASR47 0,5MW	23	14,6	6,6	2,2
NORWIN	ASR54 0,75MW	26,5	11	6,9	2,3
FUHRLANDER	FL54 1MW	26,5	15,5	8,1	2,7
FUHRLANDER	FL70 1,5MW	34,5	28	13	4,3
FUHRLANDER	FL80 2,5MW	39,5	40	18,6	6,2
FUHRLANDER	FL96 2,7MW	47	43	21,5	7,2
FUHRLANDER	FL100 2,5MW	49	45	23	7,7
DEWIND	D64 1,25MW	31,5	23	11	3,7

Hersteller	Model	Rotorblattlänge (Meter)	Rotorblatt-Gesamtgewicht (Tonnen)	Gewicht 3 Rotorblätter (Tonnen)	Blatt Gewicht (Tonnen)
DEWIND	D93 2MW	45,5	38	20,2	6,7
ACCIONA	AW70 1,5MW	34,5	15,2	11,2	3,73
ACCIONA	AW100 3MW	48	46	25	8,3
ACCIONA	AW109 3MW	53,5	48	26	8,7

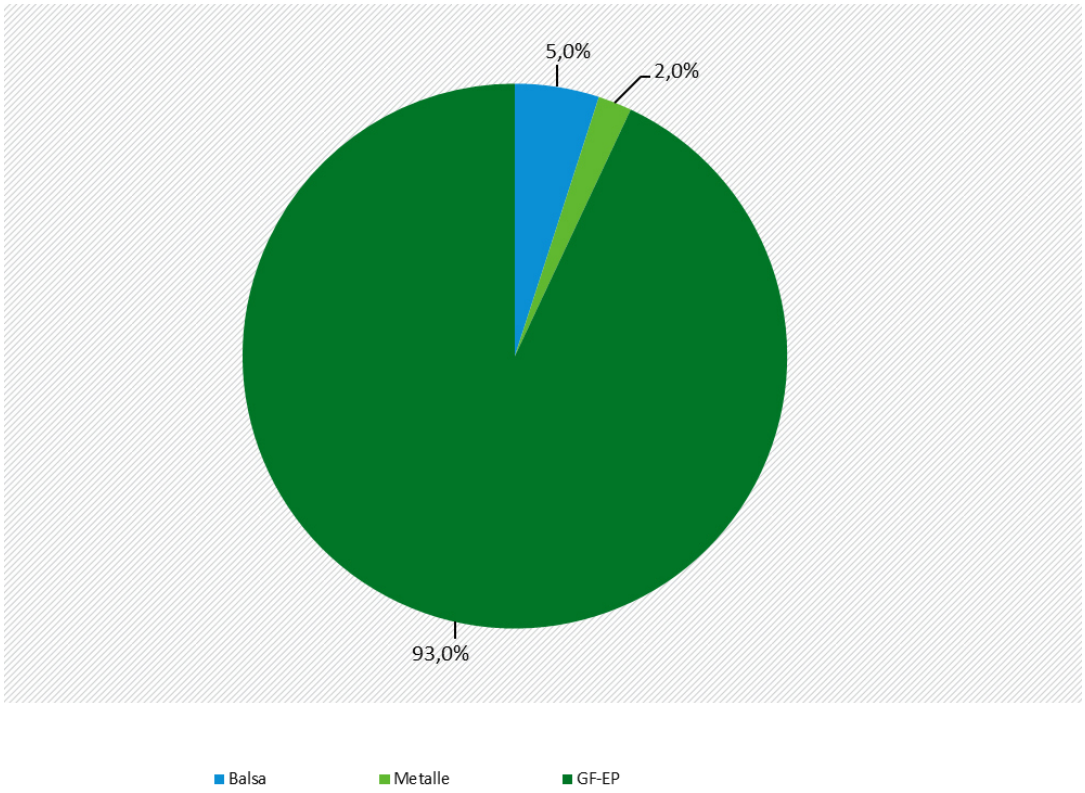
Quelle: Eigene Zusammenstellung, Fraunhofer-ICT.

Tabelle 8: Materialzusammensetzung eines typischen Rotorblatts: 45,2 m 1,5 MW.

Bestandteil	Gewichts-%
CF/GF Fabric	60,4 %
Harze und Kleber	32,3 %
Stahl	1,1 %
Kupfer	0,3 %
Aluminium	0,0 %
Balsa	2,3 %
PVC	1,7 %
Lacke	0,9 %
Putty (Kit)	0,7 %
Sprühkleber	0,0 %

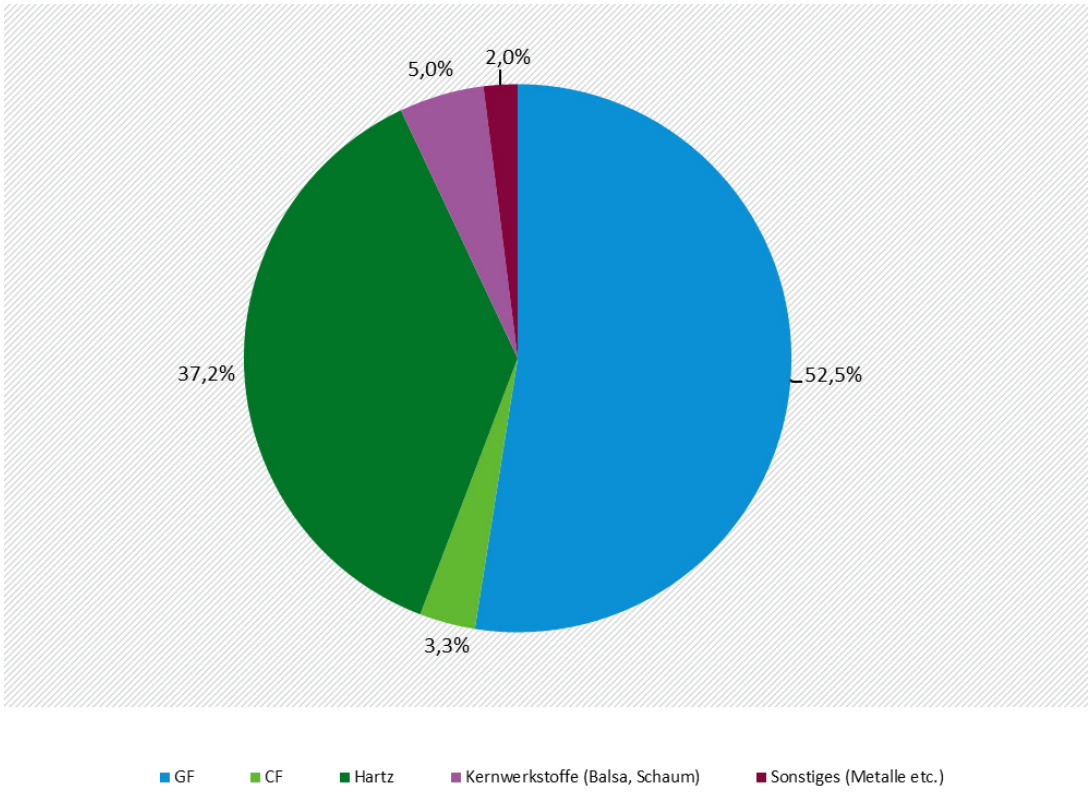
Quelle: Zusammenstellung nach Liu und Barlow (2016).

Abbildung 28: Rotorblatt Siemens B75 - 40 m.



Quelle: Zusammenstellung nach Grimm (2019).

Abbildung 29: Rotorblatt 40 m.



Quelle: Zusammenstellung nach Dieterle (2016).

2.2.4 Schäden an Rotorblättern und Lösungsansätze

Die Senkung der Stromgestehungskosten (engl. Levelized Cost of Electricity; LCOE) bleibt der Antriebsmotor für die Weiterentwicklung des Windenergiesektors. Typischerweise machen die Betriebs- und Instandhaltungskosten sowohl bei Onshore- als auch bei Offshore-Windenergie ca. 20–25% der gesamten LCOE aus (Shihavuddin und Xen 2018). Die Betreiber können über Wartungsverträge vermeiden, diese Gestehungskosten durch Schäden und Ausfall der Anlage zu erhöhen. Dies wird jedoch häufig durch die Betreiber vernachlässigt, in dem Irrglauben, ohne Wartungsverträge noch günstiger produzieren zu können.

2.2.4.1 Strukturschäden

Der Begriff "Schaden" kann spezifiziert werden als Änderungen der konstituierenden Material- und/oder geometrischen Eigenschaften einer Struktur; einschließlich Änderungen der Randbedingungen und der strukturellen Konnektivität, die sich negativ auf die strukturelle Leistung auswirken können (Li et al. 2015). Im Gegensatz zu Flugzeugen oder Schiffen können WEA relativ schnell außer Betrieb genommen werden. Infolgedessen gelten WEA als weniger sicherheitskritisch als Flugzeuge oder Schiffe, und Verluste aufgrund von Rotorblattausfällen sind in erster Linie wirtschaftlicher Natur. Aufgrund der Vielzahl von Herstellern und Prozessen, die an der Herstellung von Windblättern beteiligt sind, gibt es viele produktionsbedingte Schadensfälle. Darüber hinaus ist eine detaillierte und kontinuierliche Inspektion während des Betriebs schwierig oder nur begrenzt möglich, da der Windflügel nach der Installation unzugänglich ist. Daher wird der Safe-Life-Design-Ansatz empfohlen, bei dem die schlechteste Kombination aus Produktionsfehlern mit den schlimmsten Schäden während des Betriebs in Betracht gezogen wird.

Es sind geeignete Schadensminderungssysteme erforderlich, um Schäden in jeder Phase des Lebenszyklus von Rotorblättern zu verhindern, angefangen bei den Fertigungsschritten bis hin zur Betriebsphase.

Es gibt viele Gründe für Rotorblattschäden, angefangen bei der Herstellung bis hin zum Betrieb vor Ort. In der Regel sind herstellungsbedingte Defekte, Niederschläge, wechselnde Belastungen durch Wind, Bedienungsfehler, Blitzschlag und Feuer oder sogar Kollisionen mit Vögeln für die Rissbildung und Beschädigung von Rotorblättern verantwortlich. Wind ist die treibende Kraft des Rotorblatts, aber Windböen oder schwere Stürme können die Anlage beschädigen oder vollständig zerstören.

2.2.5 Ursachen für Schäden an Rotorblättern

2.2.5.1 Herstellungsbedingte Fehler

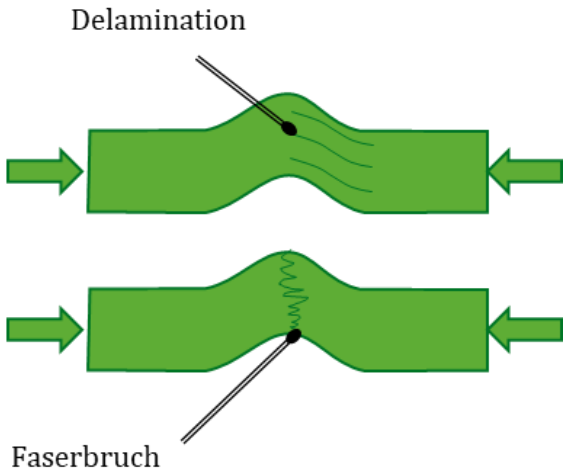
Frühe Rotorblattausfälle können aufgrund von Herstellungsfehlern auftreten. Die Herstellungsfehler können zufällig in Bezug auf Typ, Größe und Ort auftreten, einige von ihnen sind im Folgenden aufgelistet (Shohag et al. 2017):

- Lagenwelligkeit
- Porositäten
- Faser-Fehlausrichtung
- Delaminationen
- Entbindungen

- Falsche Faser/Matrix-Verteilung
- Externe und interne (Luft)-Einschlüsse
- Unvollständig ausgehärtete Matrix
- Risse in der Matrix
- Falsches Faser/Harz-Verhältnis
- Falten im Gewebe.

Diese Herstellungsfehler tragen wesentlich zur Verringerung der mechanischen Eigenschaften bei. Drei Fehlertypen von Verbundwerkstoffen, die als kritisch für die Rotorblattfunktion angesehen werden, sind Welligkeit in den Verstärkungslagen und außerhalb der Lagen sowie Porositäten/Lunker (Narayanan 2018). Die statische Druckfestigkeit und Steifigkeit von Laminaten nimmt aufgrund der Welligkeit der Fasern ab (Thor et al. 2021). Es hat sich gezeigt, dass Druckfestigkeit und Steifigkeit besonders empfindlich auf das Vorhandensein von Faserwelligkeiten reagieren. Die anfängliche Fehlausrichtung der Fasern kann die Druckfestigkeit um bis zu 60% verringern (Thor et al. 2021).

Abbildung 30: Schematische Darstellung des Schädigungsverhaltens einer Probe unter Druckbelastung.



Quelle: Eigene Darstellung, Fraunhofer-ICT, nach Thor et al. (2021).

Nelson et al. (2017) fanden in einem Laminat mit einer Porosität von 0% bis 6% eine Festigkeitsabnahme um über 20%. Alternativ können Herstellungsfehler, einschließlich fehlender oder mangelhafter Verklebungen, andere Teile des Rotorblatts, wie z. B. die Hinterkante, beeinflussen. Die geometrische Form des Rotorblatts und die derzeitige Herstellungstechnik machen die Hinterkante des Rotorblatts empfindlicher gegen Beschädigungen (Ataya und Ahmed 2013). Verschiedene Studien zeigen, dass das typische Versagen der Hinterkante das lokale Ablösen der Klebeverbindung ist (Eder et al. 2015). Die Windblatthersteller minimieren diese Fehlerart mit einem Qualitätsmanagement am Produktionsort. Dieses wird an andere Stelle (vgl. Abschnitt 2.2.8) detaillierter dargestellt.

2.2.5.2 Externe Ursachen von Schäden

In der folgenden Tabelle sind die von Chou et al. (2013) untersuchten Ursachen von Schäden an Rotorblättern exemplarisch an zwei typischen Schadensfällen dargestellt, die während einer

Studie gesammelt wurden. Die Wahrscheinlichkeit zum Auftreten dieses Schadens wurde definiert als Anzahl dieses Schadensfalles dividiert durch die gesamte Anzahl an Schäden, die in dieser Zeitspanne auftraten. Unbekannte Ursachen (ca. 19,4% der gesamten Schadensfälle) wurden von Chou et al. (2013) in der Liste nicht betrachtet.

Tabelle 9: Ursachen für Schäden an Rotorblättern.

Schadensfall	Anzahl	Wahrscheinlichkeit zum Auftreten dieses Schadens (%)
Blitz	38	32,48
Sturm	33	28,21
Starkwind	18	15,38
Tornado	3	2,56
Resonanz	3	2,56
Schneesturm	3	2,56
menschliches Versagen	2	1,71
Hagel	2	1,71
Mängel an der Anlage	2	1,71
Selbstzerstörung	2	1,71
Kollaps/ Zusammenbruch	1	0,85
Absturz des Rotorblatts	1	0,85
technischer Defekt	1	0,85
Transport	1	0,85
Bolzenschaden	1	0,85
Feuer	1	0,85
außer Kontrolle geraten	1	0,85
Planungsfehler/ Mangelhafte Planung	1	0,85
Schlag	1	0,85
Beschädigung der Masten	1	0,85
Explosion	1	0,85
Insgesamt	**117**	**99,94**

Quelle: Zusammenstellung nach Chou et al. (2013).

Im Folgenden werden einzelne Hauptschadensfälle detaillierter betrachtet.

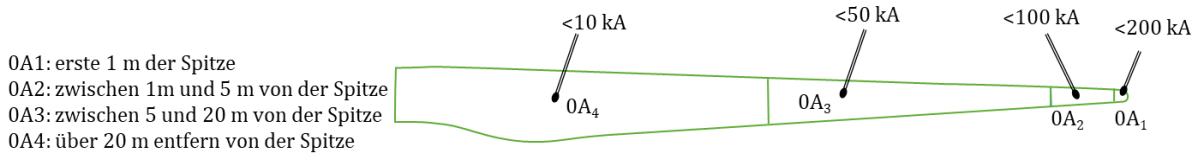
2.2.5.3 Blitzschlag

Blitzschlag ist eine der Hauptursachen für Schäden an den Rotorblättern. Er kann sehr kurze, aber außerordentlich hohe Temperaturen, oft mehr als 30.000 °C, durch eine große Menge elektrischen Stroms erzeugen, die die Werkstoffoberfläche verbrennen können. 90 % der Blitze,

die in eine WEA einschlagen, sind mit dem Rotorblatt verbunden, meistens mit der Rotorblattspitze.

Die Einschätzungen, welche Bereiche der WEA-Blätter am stärksten direkten Blitzeinschlägen ausgesetzt sind und welche Amplituden die verschiedenen Teile des Rotorblatts am ehesten erfahren, basieren auf numerischer Modellierung und Felduntersuchungen. Die Ergebnisse können durch das in Abbildung 31 dargestellte "Zonen-Konzept" zusammengefasst werden. Das Rotorblatt ist in verschiedene Expositionsbereiche unterteilt. Der erste Meter von der Spitze her ist am stärksten exponiert, mit der höchsten Wahrscheinlichkeit von Schlägen und Strömungen von bis zu 200 kA, während der Bereich zwischen der Wurzel und 15 m von der Spitze entfernt nur Stromstärken unter 10 kA ausgesetzt ist (Madesen und Carloni 2017).

Abbildung 31: Schematische Darstellung des „Zonen Konzepts“.



Quelle: Eigene Darstellung, Fraunhofer-ICT, nach Madesen und Carloni (2017).

WEA weisen unter dem Gesichtspunkt der Blitz-Gefährdung die folgenden Merkmale auf (Shohag et al. 2017):

- Lange Rotorblätter sind gefährdeter als kurze. Moderne Rotorblättern sind häufig länger als 60 m.
- Rotorblätter werden aus isolierenden Materialien wie z. B. glasfaserverstärkten Kunststoffen (GFK) hergestellt. Ein Blitzschlag kann diese Materialien vollständig verbrennen.
- Die Rotorblätter drehen sich während des Betriebs. Diese Rotation kann einen großen Einfluss auf die Anzahl der Blitzeinschläge während eines Starkgewitters auf die Blätter haben, da diese möglicherweise ihren eigenen Blitz auslösen. Daher sollten die Anlagen unter solchen Wetterbedingungen möglichst stillstehen.

Blitzeinschläge auf ungeschützte WEA-Blätter erzeugen eine verheerende interne Schockwelle durch Feuchtigkeit oder Luftausdehnung oder beides. Die vom Blitz erzeugten hohen Temperaturen können die innere Feuchtigkeit in einen expansiven Zustand (Dampf) zwingen. Infolgedessen wird das Rotorblatt durch den entstandenen inneren Druck bis zum katastrophalen Versagen beansprucht (Li et al. 2015).

Ein vollständiges Blitzschutzsystem besteht aus Fangeinrichtung, Ableitungssystem (beides zusammen wird als Blitzableiter bezeichnet) und einer Erdungsanlage. Alle Rotorblätter werden heutzutage mit einem Blitzableiter ausgerüstet, der über die Gondel und den Turm an einer Erdungsanlage angebunden ist.

In Abbildung 14 sind unterschiedliche Blitzableitersysteme in Rotorblattsystemen dargestellt. Blitzschutzsysteme werden im Abschnitt "Blitzschutzmethoden" noch eingehender diskutiert.

Es kommt bei allen WEA zu Blitzeinschlägen. Meist entstehen hierbei erhebliche Schäden, wie bereits erwähnt, insbesondere an den Rotorblättern, da diese am häufigsten von Blitzschlägen getroffen werden.

Bei der Risikobeurteilung wurde damals zwischen nicht elektrisch leitendem Material (z. B. Glasfaser) und elektrisch leitendem Material (z. B. Carbonfaser) unterschieden. Im praktischen

Betrieb wurde festgestellt, dass die anfängliche Vermutung, man könne bei Rotorblättern aus nichtleitendem Glasfaserverbundmaterial auf ein Blitzschutzsystem verzichten, sich nicht bestätigen ließ. Des Weiteren ist die Verwendung von Carbonfasern in Bezug auf Blitzschutz äußerst kritisch, wenn Schäden an der Rotorblattoberfläche entstehen können. Besonders Versicherer forderten daher einen wirksamen Blitzschutz, nicht zuletzt aufgrund der gestiegenen Anzahl und Größe der WEA.

Blitzströme auf CFK können zu mechanischem Bruch, Delamination, Erosion und Feuer führen. Die Ursachen liegen meist in der Wärmeentwicklung des in die CFK-Oberfläche eintretenden elektrischen Stroms.

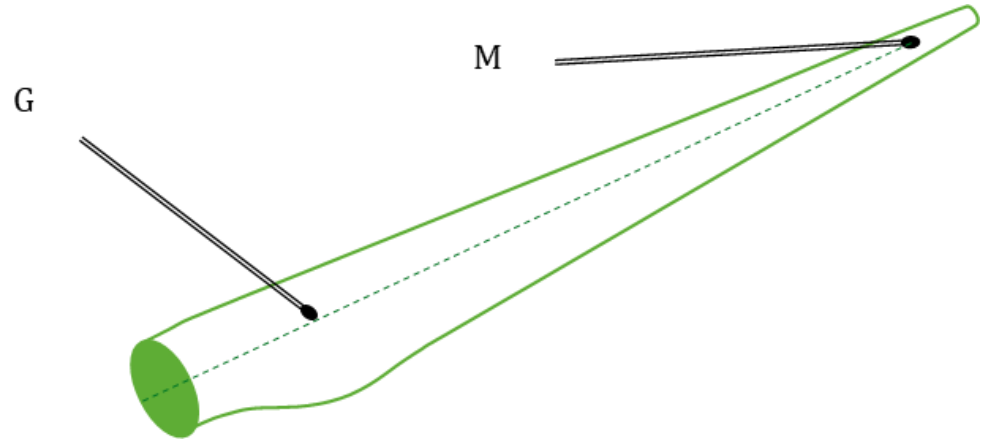
Angesichts der inhärent stochastischen Natur von Lichtbögen, Überschlägen und Materialzusammenbrüchen ist es nicht möglich, vorherzusagen, wo oder wann ein Ausfall auftreten wird. Gemäß der internationalen Norm IEC 61400-24 (IEC 61400-24:2019) zum Blitzschutz von WEA müssen alle leitfähigen Elemente innerhalb der Blätter elektrisch verbunden werden. Bei Rotorblättern, besonders bei CFK-haltigen, ist das Hauptproblem die kontrollierte Ableitung des Blitzstroms von der Rotorblattspitze (und den Luftabschlüssen) zum Wurzelende des Rotorblatts, wodurch Überschläge, Durchschläge, Funkenbildung und Verbrennungen vermieden werden können (Madesen und Carloni 2017).

Einige Ansätze wurden in den letzten Jahren formuliert, um mit Hilfe extrem leitfähiger Materialien den Strom aus den CFK-haltigen Rotorblättern schnell abzuleiten (Rehbein 2017):

- Kupferfolien: Um CFK-Bauteile vor Blitzen zu schützen, wird heute meist Kupfer als sogenanntes ECF (Expanded Copper Foil) außen auf das Bauteil mit einlaminiert (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR), Institut für Faserverbundleichtbau und Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik 2017).
- Einsetzen von leitfähigen Wirkfäden in die CFK Laminate.

Heute ist ein Blitzschutzsystem für alle neueren Rotorblätter eine Selbstverständlichkeit (Abbildung 32). Das Blitzschutzsystem besteht aus einem oder mehreren sogenannten Rezeptoren (M) im Bereich der Rotorblattspitze und einem Leitsystem (Conductor system) (G), das den Blitzstrom schnell durch das Rotorblatt über die Nabe und den Turm bis zu der Erde leitet. Im einfachsten Fall handelt es sich dabei um ein eingeschraubtes und daher leicht austauschbares Metallteil. Im Inneren des Rotorblatts verläuft ein dicker Metalldraht als "Blitzableiter" bis zur Rotorblattwurzel.

Abbildung 32: Blitzschutzsystem eines Rotorblatts.



Quelle: Eigene Darstellung, Fraunhofer-ICT, nach LM Wind Power (2010).

2.2.5.4 Niederschlag

Die Erosion durch Flüssigkeitsaufprall ist vor allem dort wichtig, wo sich der Zielkörper (Rotorblatt) mit hoher Geschwindigkeit bewegt und mit Flüssigkeitstropfen kollidiert, die sich viel langsamer bewegen. Aufgrund der höheren Rotorblattgeschwindigkeit am äußeren Teil der Blätter tritt Erosion meist an der Vorderkante auf. Aus diesem Grund ist die Wartung der Vorderkante des Rotorblatts nicht nur empfehlenswert, sondern unerlässlich, wenn die Blätter ihre vorbestimmte Lebenserwartung erreichen sollen.

Die Vorderkantenerosion der Rotorblätter kann zu Wassereintritt führen, wobei das Wasser durch Oberflächendefekte aufgrund der Erosion in die Blätter eindringt, was zu einer Korrosion der inneren Bestandteile der Blätter führt. Die Wasseraufnahme durch das Harz erhöht das Gewicht der Verbundstruktur und verursacht Schäden am Blatt.

Als Hauptverursacher für Rotorblattschäden wurden Sandkörner und Regentropfen identifiziert. Sie haben einen signifikanten Einfluss auf die Vorderkantenerosion. Diese Erosion verursacht eine Zunahme der Oberflächenrauigkeit des Rotorblatts und damit eine Zunahme der Dicke der Luftströmungsgrenzschicht über den Tragflächen auf dem Rotorblatt im Betrieb. Die erhöhte Grenzschichtdicke bewirkt einen erhöhten Luftwiderstandsbeiwert und einen verringerten Auftriebsbeiwert und reduziert dadurch die aerodynamische Leistung, insbesondere bei höheren Anstellwinkeln (Dashtkar et al. 2019; Sareen et al. 2014).

Es gibt eine Reihe von Parametern, die die Erosion durch Flüssigkeitströpfchen beeinflussen. Diese Parameter sind: Aufprallgeschwindigkeit, Aufprallwinkel, Tröpfchengröße, Flüssigkeitsdichte, Schallgeschwindigkeit, zyklische Eigenschaften von Materialien, Härte und geometrische Aspekte.

Obwohl die Größe und die Form der Tröpfchen eine Auswirkung auf die Aufprallgeschwindigkeit haben, ist der Aufpralldruck unabhängig von der Tropfengröße oder -form. Eine Erhöhung der Aufprallfrequenz des Wassertropfens erhöht auch die Schadenstiefe und die Rate und verkürzt die Schadensinkubationszeit (Dashtkar et al. 2019; Elhadi Ibrahim und Medraj 2019).

Die folgenden Faktoren beeinflussen die Erosion des Rotorblatts bei Niederschlag (Dashtkar et al. 2019):

- Aufprallgeschwindigkeit: Der Trend zur Vergrößerung des Rotordurchmessers setzt sich auch in Zukunft fort, was zu einer höheren Spitzengeschwindigkeit führt. Wenn man den Aufprall von Regentropfen betrachtet, ist die Spitzengeschwindigkeit ein Schlüsselfaktor für die Erosionsschäden. Rotorblätter der Fa. LM Wind Power mit einer Länge von 84,4 m und einer Rotorblattmasse von 34 t haben eine Nennspitzengeschwindigkeit von 80 m/s.
- Aufprallwinkel: Der Aufprallwinkel ist der Winkel zwischen der Richtung der Wasserbewegung und seiner Zielfläche. Der Einfluss des Auftreffwinkels kann vernachlässigt werden, wenn die Inkubationszeit für die Rissbildung kurz genug ist. Wenn die Inkubationszeit lang genug ist, wird die Höhe des höchsten Volumenverlustes bei einem Anstellwinkel von 90° erreicht.
- Anfänglicher Oberflächenzustand: Eine aufgeraute Oberfläche wird schneller erodieren als eine glatte Oberfläche. Die Erosion wird daher im Endstadium bei zunehmender Rauigkeit in kürzerer Zeitspanne immer schneller voranschreiten als es bei einer glatten Oberfläche der Fall wäre.

- Mechanische Eigenschaften der Oberfläche: Obwohl die Materialhärte die häufigste Erosionsschäden bestimmende Eigenschaft ist, gibt es auch andere Faktoren wie Streckgrenze, Elastizitätsmodul, Verschleißfestigkeit, Bruchfestigkeit, Rückprallelastizität und Bruchzähigkeit, die einen Einfluss auf die Bildung von Erosionsschäden haben.
- Temperatur: Sowohl die Umgebungstemperatur als auch die Flüssigkeitstropfentemperatur haben ebenfalls eine Wirkung auf die Erosionsschäden. Die Erosionsrate steigt bei höheren Temperaturen aufgrund der verringerten Viskosität der Flüssigkeit.

Derzeit gibt es zwei allgemeine Oberflächenbeschichtungssysteme, die üblicherweise von WEA-Herstellern verwendet werden. Ein System mit der Bezeichnung "Gelcoat" (bereits vorher beschrieben) wird entweder während des Herstellungsprozesses (auf Polyesterbasis) oder auf das fertige Rotorblatt aufgetragen (Epoxidbasiert). Die zweite Gruppe an Oberflächenbeschichtungssystemen besteht aus Polyurethanen (PU), die auf die Oberfläche aufgetragen werden können. Diese PU-Beschichtungen sind hochelastische und haltbare Materialien, die bei Stößen als Energieabsorber wirken und aufgrund der hohen Elastizität ein Formgedächtnis haben, welches sie beständig gegen Fugenhobeln und Abrieb macht. Diese Beschichtungen dienen dem Schutz der darunterliegenden Verbundlaminate vor Verwitterung und Fremdkörperschlag (Dashtkar et al. 2019).

2.2.5.5 Vereisung

Anti-Eis-Systeme, sogenannte De-Icing Techniken, werden in „passiv“ oder „aktiv“ unterteilt. Bei passiven Techniken werden in der Regel hydrophobe oder eisabweisende Farben für die Oberfläche verwendet.

Aktive Techniken werden zur Eis-Entfernung auf den Rotorblättern eingesetzt und sind entweder Anti-Icing oder De-Icing. Eine Anti-Icing-Technik verhindert die Ansammlung von Eis, während eine De-Icing Technik das angesammelte Eis nach bereits stattgefundener Eisansammlung entfernt. Es gibt viele Anti-Icing und De-Icing Verfahren; die meisten davon befinden sich noch in der Entwicklung. Diese Verfahren benötigen viel Energie (wärmebasiert) und werden typischerweise erst aktiviert, nachdem das abgelagerte Eis erkannt wurde. Sie bleiben aktiv, bis die Oberflächen der Blätter eisfrei sind.

Aktive De-Icing Systeme werden in zwei Kategorien unterteilt: die thermischen und die mechanischen Verfahren. Die thermischen Verfahren basieren auf Mikrowelle, elektrischer Widerstandsheizung oder heißer Luft. Die mechanischen Verfahren basieren auf Ultraschall (Daniliuk et al. 2020; Fakorede et al. 2016).

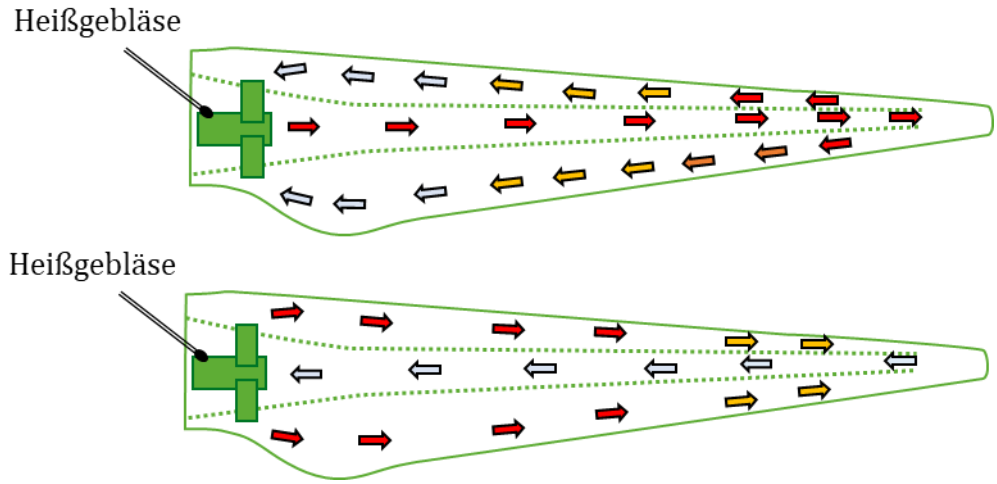
Heutzutage sind nur zwei Verfahren in Verwendung: elektrische Widerstandsheizung und Heißluft-Systeme.

Das elektrische System verwendet elektrische Heizelemente, um eine dünne Wasserschicht zwischen der Rotorblattoberfläche und dem Eis zu entwickeln, damit die Schwerkraft und die Zentrifugalkräfte das Eis von der Rotorblattoberfläche abwerfen können. Die Heizelemente sind nahe der Oberfläche des Rotorblatts installiert.

Bei der Heißluftenteisung wird heiße Luft in das Innere des Rotorblatts eingeblasen, um eine dünne Wasserschicht zwischen der Rotorblattoberfläche und dem Eis zu entwickeln. Ein Zentrifugalgebläse (kombiniert mit einer elektrischen Heizung) bläst die heiße Luft in das Rotorblatt. Blasvorrichtungen sind innen in der Nabe oder in jedem Rotorblatt in der Nähe des Fußes installiert. Die thermische Energie wird an die Rotorblattoberfläche geleitet, wodurch eine Vereisung des Rotorblatts verhindert wird. Im Rotorblattinneren, in der Nähe der

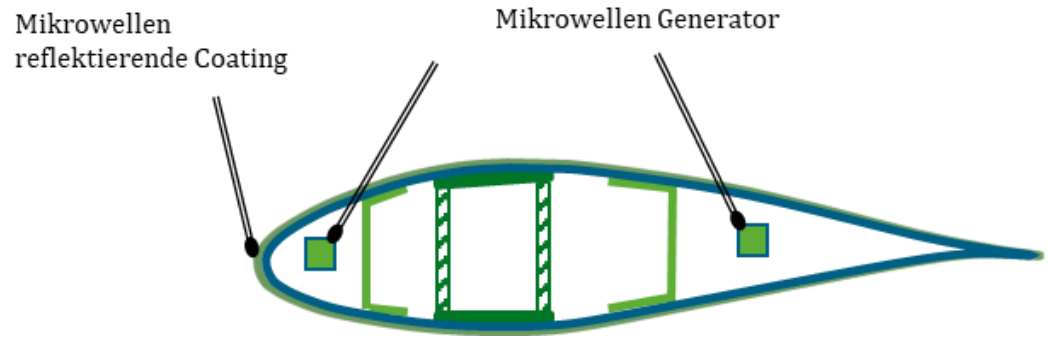
Vorderkante, kann durch spezielle Kanäle die Warmluft nahe der Eintrittskante verteilt werden (Madi et al. 2019).

Abbildung 33: Darstellung eines patentierten Heißluftenteisungs-Systems der Firma VESTAS.



Quelle: Eigene Darstellung, Fraunhofer-ICT, nach Cuoghi et al..

Abbildung 34: Darstellung eines patentierten elektromagnetischen Mikrowellenenergie De-Icing Systems.



Quelle: Eigene Darstellung, Fraunhofer-ICT nach (Grabau 1996).

Bei der mechanischen Enteisung wird Energie in Vibrationen an der Oberfläche verwandelt, um dadurch das Eis zu entfernen. Bei der Ultraschall-Enteisungstechnik werden lokale Scherspannungen durch piezoelektrische Aktoren an gewissen Positionen erzeugt, an denen sich Eis angesammelt hat, um seine Haftschicht von der Rotorblattoberfläche zu trennen. Der Unterschied in den bestehenden Eigenschaften des Eises und der Rotorblattoberfläche verändert die Geschwindigkeit der sich ausbreitenden Wellen, was Scherspannungen und damit die Enteisung erzeugt. Wassertröpfchen, die mit der Oberfläche der Rotorblätter kollidieren, schwächen die Eishaftung durch die von der Mikrowellenenergie erzeugte Wärme und verhindern so die Eisbildung (Madi et al. 2019).

2.2.5.6 Eindringen von Wasser

Bei Windblättern kommt es häufig zum Eindringen von Wasser oder zum Eindringen von Feuchtigkeit in das Rotorblattinnere, was sich nachteilig auf die Leistung und Integrität der WEA auswirken kann. Wasser dringt in die Blätter durch bereits vorhandene Risse oder andere Oberflächendefekte aufgrund von vorhergegangener Erosion an den Verschraubungen oder in der Schaumstruktur ein.

Um das Eindringen von Wasser in das Innere der Verbundstruktur zu verhindern, wird eine schützende Oberflächenbeschichtung auf der Außenfläche der Rotorblätter verwendet. Diese Beschichtung wird als "Gelcoat" bezeichnet und wurde bereits in vorhergehenden Kapiteln beschrieben. Einige Hersteller verwenden auch speziell angebrachte Bänder als zusätzlichen Schutz.

Rotorblatthersteller sowie Beschichtungslieferanten investieren stark in die Entwicklung und Umsetzung von Maßnahmen zum Schutz der Vorderkante (leading edge protection, LEP), um die Lebensdauer der Blätter zu verlängern und die Erosion an der Vorderkante zu bekämpfen. LEP besteht in erster Linie aus dem Aufbringen spezieller Beschichtungen oder auch Klebebänder auf die Vorderkante des Rotorblatts. Meistens werden zwei Oberflächenbeschichtungstechniken eingesetzt:

- In-Mould-Coatings, bei denen das Aufbringen der Beschichtung als Teil des Herstellungsprozesses des Rotorblatts integriert ist. Gewöhnlich wird ein ähnliches Material wie für die Verbundmatrix verwendet, z. B. Epoxid oder Polyester. Solche Materialien erleichtern die Integration der Beschichtung in den Herstellungsprozess, was die Techniken vorteilhaft macht.
- Post-Mould-Coatings, bei denen die Beschichtung durch Streichen oder Spritzen im Nachhinein (nach der Herstellung) aufgetragen wird. Dies ermöglicht die Verwendung verschiedener flexibler Materialien wie z. B. hoch erosionsbeständiger Elastomere.

Post-Mould-Coatings werden als LEP vor allem an Orten eingesetzt, an denen hochgradige Regen-Erosion droht. Die Beschichtung kann aus einer oder mehreren Schichten bestehen. Dies kann als positiven Nebeneffekt auch eine zusätzliche Dämpfung der Stoßerosion bewirken. Das Vorhandensein mehrerer Grenzflächen kann jedoch die Erosion aufgrund einer Delaminierung zwischen den Schichten beschleunigen. Darüber hinaus werden derartige Beschichtungen auch dazu verwendet um nach der Formgebung beschädigte Rotorblätter während der Herstellung zu reparieren (Elhadi Ibrahim und Medraj 2019).

Alternativ können auch verbesserte Fertigungstechnologien das Eindringen von Wasser in die Rotorblätter verhindern: Das Integral-Blade der Fa. Siemens AG beispielsweise benötigt keine Klebeverbindungen und wird als nahtloses Einzelteil gefertigt, wodurch kritische Schadensmodi und Wassereintritt verhindert werden. Klebverbindungen sind in der Regel Schwachstellen in einem normal hergestellten Rotorblatt (Siemens AG 2012).

2.2.5.7 Schäden durch Ermüdung

Rotorblätter weisen häufig Ermüdungsschäden auf, da sie einer widrigen Umwelt mit variablen Lasten und sich ständig verändernden Belastungen ausgesetzt sind. Das Gewicht eines Rotorblatts hängt von den Materialien und der Länge seiner Bestandteile ab und kann 15 Tonnen oder mehr betragen. Bei der Rotation werden aufgrund des Eigengewichts des Rotorblatts zyklische, schmalseitige Ermüdungslasten auf die Rotorblätter ausgeübt. Rotorblätter von WEA üben unterschiedliche Belastungen aus - von hohen Windlasten (schwere Stürme) bis hin zu geringeren Lasten, insbesondere bei Offshore-Rotorblättern. So können zyklische, klappenartige Belastungen die Entwicklung von Ermüdungsschäden induzieren, die zu einem stabilen Risswachstum führen. Der stabile Riss kann im Laufe der Zeit zu einem instabilen Riss werden, der zu einem strukturellen Versagen des Rotorblatts führen kann. Rotorblattversagen aufgrund von Ermüdungsbelastung ist ein häufiges Problem. Faktoren, die für die Ermüdungsbelastung von WEA-Blättern verantwortlich sind, sind (1) lange und flexible Strukturen, (2) Schwingungen im Resonanzmodus und (3) Zufälligkeiten in den Lastkollektiven aufgrund der Natur des Windes. Es wurde berichtet, dass relativ niederfrequente, aber

hochamplitudige Windschubkräfte erheblich zu Ermüdungsschäden beitragen. Darüber hinaus kann eine Windböe mit einer plötzlichen Richtungsänderung zu großen aerodynamischen Belastungen führen, die Ermüdung, automatische Abschaltungen oder sogar Schäden an einigen Turbinenkomponenten verursachen. Die Ermüdung eines Rotorblatts wird stark von den zyklischen Belastungen beeinflusst, die in vertikaler Richtung variieren (Shohag et al. 2017).

Wenn die Ermüdungserscheinungen eines rotierenden Rotorblatts bekannt sind, können diese Schäden vermieden werden, indem die erforderlichen Maßnahmen vor dem Ende der Lebensdauer ergriffen werden. Die Ermüdungsabschätzung erfordert die Berechnung von Modenformen und Frequenzen sowie die Berechnung von Verschiebungen und Spannungen, die auf die Blätter einwirken. Diese werden mit Methoden zur Berechnung schädlicher Frequenzen charakterisiert. Eine kontinuierliche Überwachung der Abweichungen der Spannungen und deren Material-Frequenzen im Vergleich zum Neu-Zustand ermöglicht eine Vorhersage, wann ein Rotorblatt eine erforderliche Wartung benötigt (Shohag et al. 2017).

2.2.5.8 Schäden durch Feuer

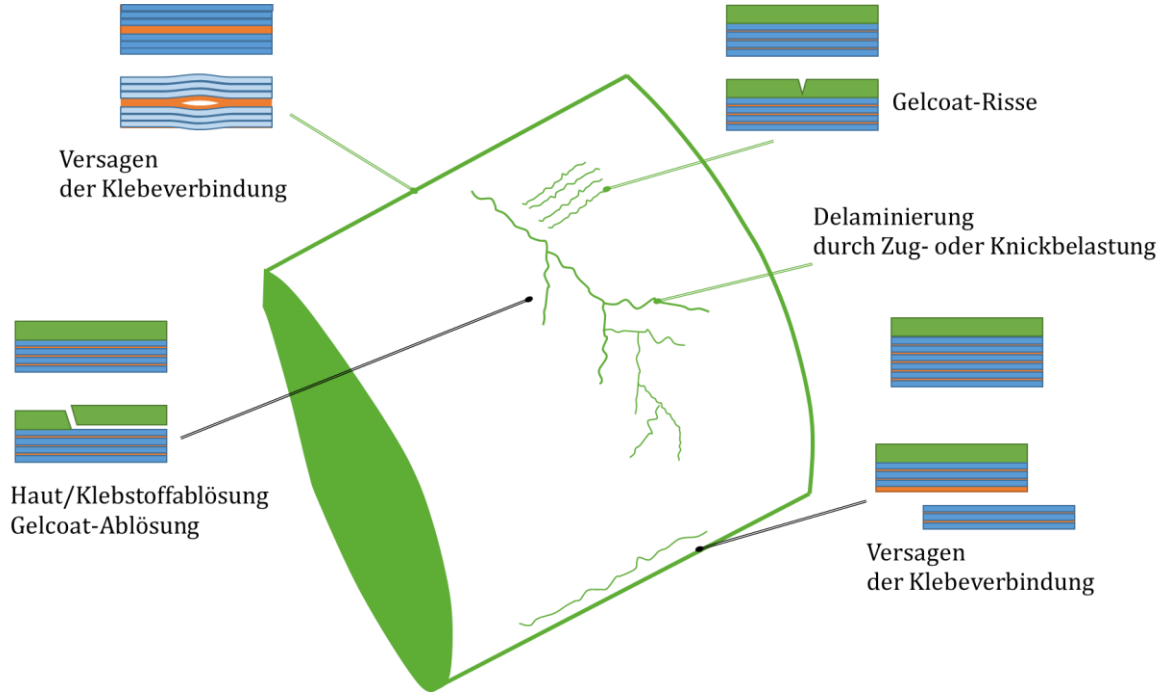
Feuer kann eine WEA vollständig zerstören. Die Ursachen für die Entzündung von Bränden in WEA sind hauptsächlich Blitzeinschläge, elektrische Fehlfunktionen, mechanisches Versagen und Fehler bei der Wartung. Bremssysteme in WEA stellen ebenfalls ein hohes Brandrisiko dar. Leicht entflammbare Materialien, Hydrauliköl und Kunststoffe werden in WEA verwendet, die sich normalerweise in unmittelbarer Nähe von Maschinen und elektrischen Leitungen befinden. Überhitzung in diesen Maschinen oder fehlerhafte elektrische Drähte können ursächlich ein Feuer entfachen (Shohag et al. 2017).

2.2.6 Monitoring

Schäden an einem Rotorblatt können auf verschiedene Arten auftreten. Typische Schäden an Rotorblättern sind aufgelistet und in Abbildungen beschrieben:

- Schadensbildung und -wachstum in der Klebstoffschicht, die Haut- und Hauptholmflansche verbindet (Haut/Klebstoffablösung und/oder Hauptholm/Klebstoffschichtablösung).
- Schadensbildung und -wachstum in der Klebstoffschicht, die die Auf- und Abwindmodule entlang der Vorder- und/oder Hinterkanten verbindet (Versagen der Klebeverbindung zwischen diesen Modulen).
- Schadensbildung und -wachstum an der Schnittstelle zwischen Deckschicht und Kern bei Sandwichpaneelen in der Außenhaut und im Hauptholm (Sandwichpaneel Deckschicht/Kern-Entflechtung).
- Innere Schädigungsausbildung und -wachstum in Laminaten in Haut- und/oder Hauptholmflanschen unter Zug- oder Druckbelastung (Delaminierung durch Zug- oder Knickbelastung).
- Spaltung und Bruch einzelner Fasern in Laminaten der Oberfläche und des Hauptholms (Faserbruch bei Zug; Laminatbruch bei Druck).
- Knickung der Oberflächenhaut aufgrund von Schädigungsbildung und Wachstum der Verbindung zwischen Haut und Hauptholm unter Druckbelastung (durch Knickung induzierte Haut-/Klebeablösung, ein spezieller Typ-1-Fall).
- Bildung und Wachstum von Rissen im Gelcoat; Ablösung des Gelcoats von der Oberfläche (Gelcoat-Risse und Gelcoat/Hautablösung).

Abbildung 35: Verschiedene Arten von Rotorblattschäden.



Quelle: Eigene Darstellung, Fraunhofer-ICT, nach Du et al. (2020).

Um Rotorblätter zerstörungsfrei zu prüfen, existieren Verfahren wie das Ultraschall-Echo-Verfahren, die lokale Resonanzspektroskopie, die Computer-Laminographie und die Wärmefluss-Thermographie (Martinez-Luengo et al. 2016; Sarrafi et al. 2018).

2.2.6.1 Ultraschall Echo Verfahren

Bei dem Ultraschall-Echo-Verfahren wird ein Ultraschallpuls über einen Sensor in das Bauteil gesendet und die Wellen an der Bauteilrückwand oder an inneren Schädigungen reflektiert. Dieses Verfahren wird angewendet, z. B. um die Stegverklebungen der Rotorblätter zu überprüfen. Bei der lokalen Resonanzspektroskopie wird das Rotorblatt an kritischen Stellen punktweise abgeklopft und so zu Schwingungen angeregt. Durch Risse im Untersuchungsobjekt ändert sich das Schwingungsverhalten und somit auch der erzeugte Klang (Du et al. 2020; Ciang et al. 2008).

Ultraschall-Sondierungen zeigen typischerweise planare Risse (z. B. Delaminationen), die senkrecht zur Richtung der Schallwellenausbreitung verlaufen. Die Sendezeit und/oder die Amplitude des Ultraschalls wird in der Regel überwacht. Die Durchgangszeit kann zur Bestimmung der relativen Position des Defekts verwendet werden bezogen auf die Position der Wandler, während die Amplitude zur Beurteilung des Schweregrads des Defektes dient. Auf diese Art können Schädigungen der Länge bis zu einigen Millimetern nachgewiesen werden.

Die Ultraschallprüfung hat ihre Wirksamkeit in einer Vielzahl von Anwendungen, z. B. Inspektion von geklebten mehrschichtigen Strukturen, laminierten Verbundkomponenten, einschließlich Erkennung von Delaminationen und interlaminaren Schwächen. Im Falle von geklebten mehr-schichtigen Strukturen wurde ein begrenzter Erfolg mit der Ultraschalltechnik erzielt. Sie eignet sich zur Erkennung von Delaminationen und Rissen im Klebstoff, die rechtwinklig zur Ausbreitung der Ultraschallwellen ausgerichtet sind, für Schlagschäden, Hohlräume und Porositäten (Martinez-Luengo et al. 2016; Ciang et al. 2008).

2.2.6.2 Akustische Detektion

Detektionsmethoden, die auf Schallemission basieren, konzentrieren sich auf die Erfassung von elektrischen Signalen, die aus transienten elastischen Wellen umgewandelt werden und durch die Freisetzung von Energie aus Schädigungseinleitung, Rissausbreitung oder plastischer Verformung verursacht wurden. Eine Schädigung führt zu einem Energieausbruch, der Schallwellen mit hoher Frequenz innerhalb der Rotorblattstruktur erzeugt und durch Schallemissions-Sensoren überwacht werden kann. Das Auftreten, der Ausbreitungsprozess und das Versagen des Rotorblatts kann durch die Charakteristika der Schallemissionswellenform wie Amplitude, Energie, Anstiegszeit, usw. ermittelt werden (Du et al. 2020).

2.2.6.3 Inspektion von Rotorblättern mit Wärmefluss-Thermographie

Die Computerlaminographie ist eine Alternative zur Computertomographie, wobei das Material schichtweise untersucht wird und die dabei entstehenden Einzelaufnahmen so miteinander kombiniert werden, dass ein dreidimensionales Bild des Objekts entsteht. Mit dem Ziel, die werthaltigen (faserreichen) Materialbereiche im Rotorblatt näher zu identifizieren, wurde die Methode der Wärmefluss-Thermografie entwickelt. Bei dieser zerstörungsfreien Prüfung wird das Untersuchungsobjekt einem Wärmeimpuls ausgesetzt. Die so erzeugte Wärmefront dringt in das Objekt ein, während die Oberfläche wieder abkühlt. Vorhandene Fehlstellen im Rotorblatt besitzen eine geringere Wärmeleitfähigkeit und behindern so die Ableitung der Wärme ins Innere. Durch diese unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeiten können Schäden in der Oberfläche mittels eines Thermogramms erkannt werden.

Die Materialien in einem Rotorblatt besitzen ebenfalls unterschiedliche Wärmeleitfähigkeiten und Wärmekapazitäten, wodurch sie gut auf dem Thermogramm zu erkennen sind.

Die Wärmefluss-Thermographie ermöglicht Qualitätsüberprüfungen von Werkstücken, ohne diese zu zerstören. Hierdurch stellt sie ein hoch effektives Prüfverfahren dar. Es werden äußerlich unsichtbare Fehlstellen durch die Analyse der Wärmeleitfähigkeit bzw. des Wärmeflusses entdeckt. Das bildgebende Funktionsprinzip ist beim thermographischen Wärmefluss-Prüfverfahren von Vorteil. Das trifft auch auf die hohe Geschwindigkeit zu, mit der das Verfahren durchgeführt werden kann sowie die relativ einfache Automatisierbarkeit des Prozesses. Angewendet wird dieses Verfahren vor allem bei der Erkennung von Materialdefekten, die unter der Oberfläche liegen (Risse, Haftungs- und Klebefehler, Blasen, Lunker, Delaminationen oder Korrosion) und in Verbundmaterialien bei der Bestimmung von Schickdicken. Schweißnähte und Schweißpunkte können ebenfalls mittels Wärmefluss-Thermographie überprüft werden (Li et al. 2015).

Um einen reibungslosen Betrieb von Rotorblättern gewährleisten zu können, bedarf es einer regelmäßigen Wartung. Hierfür eignet sich auch die Wärmefluss-Thermographie, um die häufigsten Fehler wie Lufteinschlüsse, Verklebungsfehler oder Risse zu entdecken. Die Geschwindigkeit der modernen Infrarot-Technik zeigt hier einen enormen Vorteil gegenüber der traditionellen visuellen Perkussionsmethode. Sie kann diese dank einer Erfassung von mehreren Quadratmetern innerhalb einer Minute zuverlässig ersetzen. Auch kann sie in der Fertigung zur Qualitätskontrolle der Rotorblätter eingesetzt werden (Du et al. 2020).

Nicht nur durch stetig wachsende Rotordurchmesser von Windenergieanlagen entwickeln sich Rotorblätter zu zunehmend komplexeren Bauteilen. Auch die Geometrien der Flügel werden zugunsten besserer aerodynamischer Eigenschaften und geringerer Schallabstrahlung immer komplizierter. Eine Vielzahl verschiedener Materialien, wie beispielsweise glas- und kohlefaserverstärkter Kunststoff (GFK/CFK) mit Polyester- oder Epoxidharzen als Basis, Metall, Holz und geschäumte Kunststoffe kommen bei der Herstellung zur Anwendung. In der

Vergangenheit wurde der Qualitätssicherung bei der Fertigung der Rotorblätter zu wenig Beachtung zugemessen. Hierdurch kommt es immer wieder zu Rissen im Gurt- oder Stegbereich durch Materialversagen. Schlussendlich kann dies sogar zum Rotorblattabwurf, also dem Totalversagen des Rotorblatts, führen.

Das Rotorblatt wird während einer Inspektion mithilfe eines Infrarot-Heizstrahlers erwärmt, um schadhafte Stellen zu erkennen. Durch ihre abweichende Wärmeleitfähigkeit verändert sich der Wärmefluss, wodurch Risse, Lufteinschlüsse oder Verklebungsfehler erkannt werden können. Während der Wartungsfahrt werden diese Veränderungen des Wärmeflusses durch die in einem Roboter verbaute Thermographie-Kamera aufgezeichnet und in Bilder umgewandelt. Diese können dann am Computer mit einer ebenfalls vom Fraunhofer WKI entwickelten Spezialsoftware angesehen und optimiert werden (z. B. Rauschunterdrückung, Kontrastverbesserung, Hintergrundabzug). Auch können Kameraeinstellungen mittels der Software angepasst werden. Der Roboter zeichnet während der Fahrt hochauflösende optische Fotos auf. Diese dienen der Navigation sowie der besseren Beurteilung oberflächlich sichtbarer Materialfehler (Fraunhofer WKI 2021).

2.2.6.4 Unbemannte Inspektion von Rotorblättern

Um kostenintensive Stillstands- und Reparaturzeiten zu minimieren und den erfolgreichen Betrieb eines Windparks sicherzustellen, ist es notwendig, Inspektionen während des Betriebs durchzuführen. Da die Länge der Blätter zunimmt und die Betriebsumgebung hohe Belastungen in den Blättern erzeugt, wird es immer wichtiger, den Beginn von Schäden oder die Ausbreitung von Fertigungsfehlern während des Blattbetriebs zu erkennen. Detaillierte zerstörungsfreie Inspektionen sind auch notwendig, um festzustellen, ob Reparaturen erforderlich sind und um die Qualität der Reparatur zu beurteilen (Post-Reparatur-Inspektionen). Kleine Defekte können sich während des Betriebs der Schaufel zu bedenklichen Werten ausbreiten, während Ermüdungsbelastungen, Vogel-/Hagelschlag, Blitzschlag, Erosion und andere Betriebsbedingungen zu neuen Schäden an den Schaufeln führen können (Ely et al. 2018).

Unbemannte Monitoring Systeme sind automatisierte, ferngesteuerte Inspektionssysteme, die Schäden an den Rotorblättern erkennen können und schnell große Bereiche an Land- und Offshore-Rotorblättern inspizieren können.

Ein solches System ermöglicht kosteneffiziente, routinemäßige Inspektionen an der Oberfläche (rein optische) und unter der Oberfläche (Ultraschall, Infrarot), die bei bemannten Inspektionen nicht durchgeführt wurden und ermöglicht so eine maximale Lebensdauer der Rotorblätter. Unverzügliches Monitoring ermöglicht frühzeitige Reparaturen (Inspektion nach der Reparatur), wodurch hohe Austauschkosten vermieden werden (Ely et al. 2018).

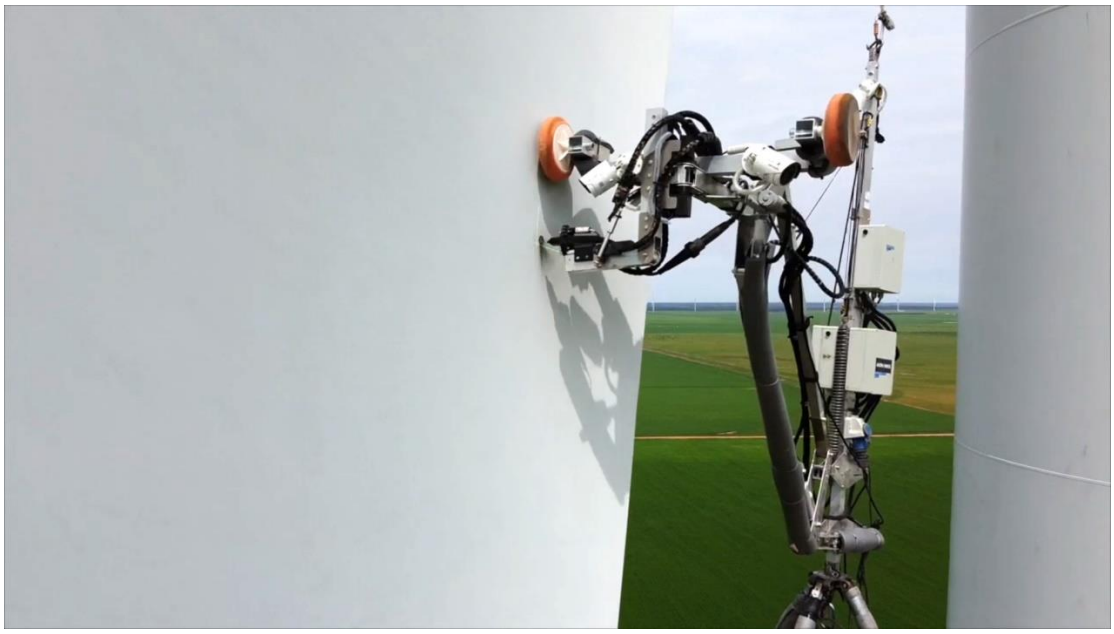
Ein System mit Drohnen besteht aus zwei Elementen:

- Drohne mit Inspektionssystem (optische Kamera oder IR Kamera), um aus der Entfernung Defekte auf der Fläche des Rotorblatts detektieren zu können,
- Workstation am Boden für Datenerfassung, Datenanalyse und Robotersteuerung.

Nachteil der Drohne ist die Auflösung der Aufnahmen. Diese ist stark abhängig vom Abstand zwischen Drohne und Rotorblatt. Alternativ zur Drohne wurden in den letzten Jahren Kletterroboter entwickelt, die auf der Fläche des Rotorblatts direkt deren Inspektion durchführen können. Ein solcher Roboter ist ein unbemanntes zerstörungsfreies Inspektionssystem (z. B. Phased Array-Ultraschall für die Erkennung von oberflächigen und tieferen Schäden oder IR-Sensor) mit optischer Kamera und wireless integrierter Signalübertragung (Ely et al. 2018).

Unbemannte Roboter werden auch eingesetzt um Inspektion, Wartung und Reinigung durchzuführen. In Abbildung 36 ist ein Roboter der Firma Aerones dargestellt, der die Vorderkante des Rotorblatts inspizieren und reinigen kann. Dieses System kann zusätzlich Reparaturen durchführen. Zunächst wird das Rotorblatt vor der Reparatur gescannt und ein 3D-Modell des Rotorblatts in 12 µm Genauigkeit erstellt, um den Zustand des Rotorblatts zu beurteilen und die Werkzeuge anzupassen. Danach wird die beschädigte/erodierte Schicht entfernt, um das Auftragen eines neuen Schichtfüllers zu ermöglichen. Das Rotorblatt wird gereinigt und für das Auftragen des Füllers vorbereitet, um eine maximale Haltbarkeit des später aufgetragenen Materials zu gewährleisten. Eine exakte Menge des Füllmaterials wird auf das Rotorblatt aufgetragen und hochpräzise profiliert. Nach der Reparatur wird das Rotorblatt erneut gescannt, um das Ergebnis zu überprüfen und höchste Qualität zu garantieren. Nach jedem der Schritte ist es notwendig, die Roboterarme zu wechseln. Jeder der Roboterarme führt eine andere Aufgabe aus (Aerones Inc. 2020).

Abbildung 36: Winch Operated Robot der Firma Aerones.



Quelle: Aerones Inc. (2020).

2.2.6.5 Modalbasierte Ansätze

Modalbasierte Methoden sind auf Strukturen jeder Größe einfach zu implementieren und deswegen eine oft genutzte Methode der Schadenserkennung. Strukturen können durch Umgebungsenergie angeregt werden (mittels externer Schwingerreger oder eingebetteter Aktoren); als Sensoren können eingebettete Dehnungsmessstreifen, Piezokeramiken oder Beschleunigungsmesser verwendet werden, um die Reaktionen zur angeregten Schwingung zu überwachen. Modale Parameter wie z. B. Frequenzen, Modenformen und modale Dämpfung sind eigene physikalische Eigenschaften einer Struktur die von Masse, Dämpfung und Steifigkeit abhängig sind. Die Erkennung von Strukturschäden basiert auf einem Vergleich zwischen der Reaktion im Neuzustand und im geschädigten Zustand. Die Änderungen der modalen Eigenschaften oder von diesen abgeleiteten Eigenschaften werden als Indikatoren für Schäden verwendet, die modal-basierte Schadenserkennung reduziert sich dann auf eine Form der Mustererkennung (Li et al. 2015; Du et al. 2020; Sarrafi et al. 2018).

2.2.6.6 Optische Kunststoff-Fasern

Die optische Leistung einer Lichtquelle nimmt ab, wenn sie durch eine optische Faser aus Kunststoff geschickt wird. Auf diesem Effekt basieren die Überwachungssysteme mit optischen Fasern. Die Reduzierung hängt von der Dehnung der optischen Kunststoff-Faser ab. Dieses Prinzip kann verwendet werden, um die Dehnung in einer Struktur zu erfassen.

Das Licht durch die optische Faser fällt anschließend in einen Photodetektor; die optische Leistung kann mit einem optischen Leistungsmesser gemessen werden. Wenn die Belastung zunimmt, verringert sich die gemessene optische Leistung und kann so zur Erkennung von Schäden genutzt werden (Li et al. 2015; Du et al. 2020; Sarrafi et al. 2018).

2.2.6.7 Vermeidung von Schäden durch Ermüdungsbelastung

Blattschäden aufgrund der Ermüdungsbelastung sind ein sehr häufiges Problem. Wenn die Ermüdungslebensdauer eines rotierenden Rotorblatts bekannt ist, können diese Schäden im Rahmen vorsorglicher Wartung vermieden werden, indem die erforderlichen Maßnahmen vor dem Ende der Lebensdauer ergriffen werden. Die Ermüdungsabschätzung erfordert die Berechnung von Modenformen und Frequenzen sowie die Berechnung von Verschiebungen und Spannungen, die auf die Rotorblätter einwirken.

2.2.6.8 Verhinderung von Rotorunwuchten

Viele Defekte einer Turbine stehen im Zusammenhang mit Schwingungen, die durch Rotorunwuchten verursacht werden. Eine frühzeitige Erkennung dieser Unwuchten ist erforderlich, um Turbinenschäden zu verhindern und eine längere Lebensdauer zu gewährleisten. Mehrere Algorithmen und mathematische Modelle wurden von Forschern entwickelt, um dieses Problem zu vermeiden.

Ein mathematischer Ansatz basiert auf Schwingungsgleichungen und wird zur Bestimmung beider Unwuchten verwendet und daraus eine Rekonstruktionsmethode entwickelt, die in ein Zustandsüberwachungssystem implementiert wird.

Im Folgenden wird die am häufigsten verwendete Methode zur Erkennung und Messung der Rotorunwuchten beschrieben. Aerodynamische Unwuchten werden durch Schwingungsmessung in radialer, axialer und Torsionsrichtung erfasst und mit optischen Methoden anschließend die Abweichung des Anstellwinkels ermittelt (Niebsch 2011). Nach Beseitigung der aerodynamischen Unwuchten werden die verbliebenen Schwingungen gemessen, um die Massenunwuchten zu charakterisieren. Die Unwucht und ihre Position werden durch wiederholte Messungen berechnet, wobei dazu eine Testmasse auf einem Rotorblatt befestigt wird. Der Betrag der aerodynamischen Unwucht variiert mit der Rotordrehzahl und der Windgeschwindigkeit. Daher ist im Gegensatz zur Massenunwucht eine Beseitigung der aerodynamischen Unwucht durch Hinzufügen von Gegengewichten nicht möglich (Shohag et al. 2019).

2.2.7 Reparaturmaßnahmen

Wie in Kapitel 2.2.5 erwähnt, gehören zu den Hauptursachen für Schäden an den Rotorblättern: Herstellungsfehler, Transportschäden, Montageschäden, Installationsschäden, Blitzeinschläge, Umweltverschleiß, Regen, Sand und Verschmutzungen, Erosion, Vogelschlag, Temperaturschwankungen und Vorderkantenerosion, Ermüdung, Eindringen von Feuchtigkeit und Aufprall von Fremdkörpern, Austritt von Feuchtigkeit durch die Laminathaut als Folge der Oberflächenbeschädigung sowie mechanisches Versagen.

Das allgemeine Verfahren der Reparatur wurde bei Lekou et al. (2006) wie folgt beschrieben:

1. Auffinden von Schäden durch visuelle Inspektion, Beobachtung der Änderungen der Materialeigenschaften oder zerstörungsfreie Inspektion durch Techniken, wie z. B. Ultraschallmethoden.
2. Bestimmung des Grades und der Art der Schädigung.
3. Analyse des Spannungszustands in dem geschädigten Teil und Wahrscheinlichkeit des Risswachstums.
4. Zeichnung & Skizze der Reparatur im Hinblick auf die Verfügbarkeit von Reparaturmöglichkeiten, mögliche Fortentwicklung der Schäden, erwartete Reparaturergebnisse und Reparaturkosten.
5. Entfernung des beschädigten Bereichs und Struktur-Vorbereitung.
6. Herstellung der Teile für die Reparatur.
7. Reparaturteile anbringen.
8. Nach der Reparatur eine Inspektion durchführen.
9. Die Reparatur dokumentieren.
10. Reparaturbereich überwachen.

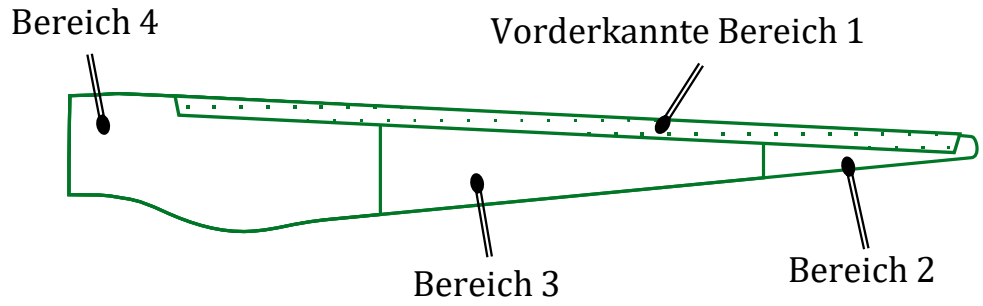
Die Reparaturtechniken können nach (a) Schweregrad der Beschädigung, (b) Bereich der Beschädigung und (c) aerodynamischen/bündigen Anforderungen klassifiziert werden. Je nach Schwere und Art des Schadens werden die Reparaturtechniken wie folgt gruppiert:

- Erosionsreparatur und -schutz, typischerweise durch Beschichtungen, Bänder, Schilde,
- Nicht strukturelle Matrixrisse, kosmetische Reparaturen. Füllung und Abdichtung, Harzinjektion für kleinere Oberflächenrisse oder kleine Delaminationen,
- Strukturelle Schäden: Plug/Patch- und Schalreparatur.

Mit Blick auf die verschiedenen Schadensregionen und Strukturschäden für eine Reparatur identifizierte vier Rotorblatt-Reparaturzonen (Mishnaevsky 2019):

- Zone 1: Vorderkante
- Zone 2: Hinter der Vorderkante, semi-strukturelle Reparatur
- Zone 3: In der Mitte zwischen Spitzenbereich und Wurzelbereich, einschließlich Hinterkante
- Zone 4: Wurzel-nah und an der Wurzel, die einer halbstrukturellen und strukturellen Reparatur bedürfen.

Abbildung 37: Schadenszonen an geschädigten Rotorblättern.



Quelle: Eigene Darstellung, Fraunhofer-ICT, nach Heslehurst (2015), Du et al. (2020) und Mishnaevsky (2019).

2.2.7.1 Reparaturen an der Vorderkante

Die Erosion der Vorderkante ist in der Tat die häufigste Art der Beschädigung an Rotorblättern. Die Vorderkantenerosion von WEA-Blättern hängt von den Belastungsbedingungen der Vorderkante und der Oberfläche von WEA ab (Regendichte, Regentropfengrößenverteilung, Staub, Strömungsgeschwindigkeit) sowie von den Eigenschaften des Beschichtungs-/Gelcoat-Schutzsystems (Festigkeit, Steifigkeit, Viskosität, Dämpfung) (Amirzadeh et al. 2017). Das erodierende Abtragen und Aufrauen der Vorderkantenoberfläche erfolgt durch die Materialermüdung und Schadensakkumulation durch mehrfache Flüssigkeitseinwirkung der Regentropfen (Amirzadeh et al. 2017). Jeder Regentropfen trifft auf die Oberflächen, wodurch Druck auf die Oberfläche und Wellenausbreitung in den Schutzschichten entsteht. Dies führt zu Verformung und Schadensinitiierung sowie zu Materialermüdung und -degradierung im Laufe der Zeit. Die Oberflächenerosion wirkt als Beschichtungsriss, Ablösung, Riss im Verbundwerkstoff, Materialverlust und Rauigkeit der Oberfläche (Mishnaevsky 2019).

Zu den Lösungen für die Reparatur von Vorderkantenerosion gehören Schutzbänder (formbare, abriebfeste Polyurethan-Elastomere), Schutzbeschichtungen (die entweder mit einem Pinsel oder durch Gießen aufgetragen werden) oder Epoxid- und Polyurethan-Füllstoffe. Während die meisten dieser Lösungen tatsächlich einen gewissen Schutz für die Eintrittskante bieten, können diese Lösungen die erforderliche Lebensdauer von 15 bis 20 Jahren nicht gewährleisten. Viele Beschichtungen haben eine Lebensdauer von höchstens acht Jahren.

In den folgenden Abbildungen sind die Reparaturen an den Vorderkanten eines Rotorblatts demonstriert (links ist der Schaden dargestellt und rechts die entsprechend durchgeführte Reparatur).

Abbildung 38: Bereiche mit Lackabplatzungen, Kratzern und Oberflächenschäden (Fraunhofer ICT, Pfinztal).

Quelle: Eigene Darstellung, Fraunhofer-ICT.

Abbildung 39: Bereiche mit beschädigter Erosionsschutzfolie (Fraunhofer ICT, Pfinztal).

Quelle: Eigene Darstellung, Fraunhofer-ICT.

2.2.7.2 Oberflächen- und Delaminierungsrisse: Injektionsreparatur

Eine weitere Gruppe von nicht-strukturellen Schäden in Verbundwerkstoffen sind Matrixrisse, geringfügige Delaminationen und Debonding. Die Fasern bleiben dabei noch unbeschädigt und die strukturelle Integrität der Laminate ist nicht gefährdet. Matrixrisse können jedoch eine Quelle für fortschreitendes Riss-/Delaminierungswachstum, auch mit Feuchtigkeitsdurchdringung, sein. Die Reparatur für solche Defekte wird durch Injektion von Reparaturharz in die Risse/Löcher durchgeführt. Das Harz mit niedriger Viskosität füllt und dichtet den Riss ab. Vor der Injektion werden Löcher in die Defektoberfläche gebohrt. Auf dem Markt werden unterschiedliche Harzsysteme angeboten, die die Reparaturen ermöglichen.

Für Sandwich-Strukturen wird zum Beispiel die Reparatur durch Vergussmassen realisiert. Der beschädigte Bereich (d. h. die Wabe) wird mit einem Verguss gefüllt (z. B. Epoxidharz, gefüllt mit Hohlglas oder Phenolharzen). Diese Reparatur ist aufwändig und stellt nicht die vollen mechanischen Eigenschaften des Bauteils wieder her. Um eine vollständige Wiederherstellung der Leistung zu gewährleisten, kann ein externer Schutzschild auf den versiegelten Bereich aufgebracht werden, der nach der Reparatur entweder nichttragend, vollständig oder teilweise belastbar ist .

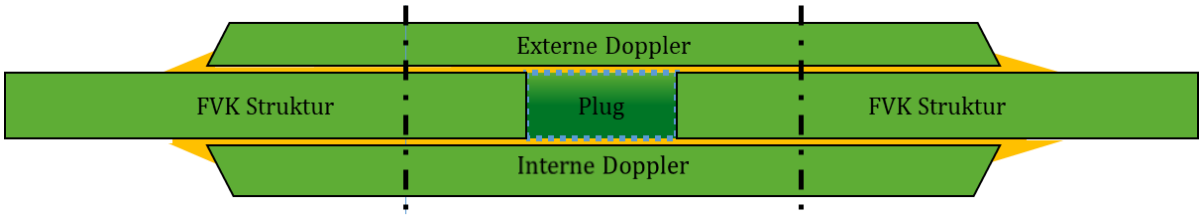
Die Qualität und Effizienz der Injektionsreparatur hängt von den Fließeigenschaften des Harzes, der Harzviskosität und der Haftung mit den Verbundwerkstoffen ab.

2.2.7.3 Strukturreparaturen, Patches und Scarfs (Flicken-Reparatur)

Eine weitere Gruppe von Reparaturtechniken wird angewendet, wenn die Verbundfasern ebenfalls beschädigt sind. Strukturelle Reparaturen können mit geklebten und geschraubten Reparaturtechniken durchgeführt werden.

Bei stark belasteten Laminaten mit aerodynamischen Anforderungen können sogenannte „bolted doublers“ (geschraubte Verbindungen) verwendet werden, die einfach und schnell anwendbar sind (da kein Materialabtrag erforderlich ist) und eine Strukturreparatur auf hohem Niveau gewährleisten. „Bolted Doublers“ gewährleisten keine aerodynamisch glatten Oberflächen.

Abbildung 40: Verschraubungs-Reparatur („bolted doublers“).



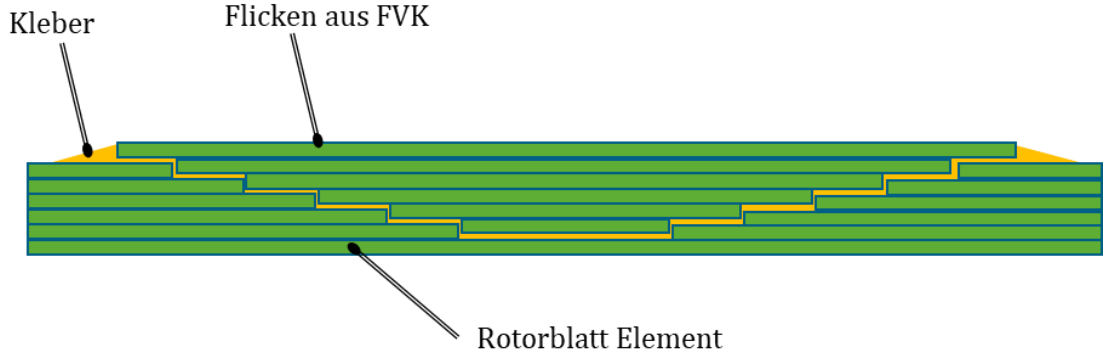
Quelle: Eigene Darstellung, Fraunhofer-ICT, nach Dorworth (2013).

Wenn aerodynamische Eigenschaften von entscheidender Bedeutung sind, ist die „flush repair“ (Spülsanierung) die am häufigsten angewendete Reparaturtechnik für Strukturen. Die strukturelle Spülsanierung wird durch die Ausbildung einer Fuge zwischen dem vorbereiteten Reparaturbereich und dem Reparaturflicken realisiert, die genau in den für die Reparatur vorbereiteten Bereich passen sollte. Das Verfahren umfasst die Entfernung des beschädigten Bereichs und die Verklebung eines Flickens mit konischen (oder abgestuften Enden) in das Ausgangslaminat (Mishnaevsky 2019).

Patches (Flicken) werden normalerweise mit der Handlaminierungstechnik (Lay-up) aufgetragen und oft mit unidirektionalen oder biaxialen unausgehärteten Prepregs hergestellt, in der Regel aus dem gleichen Gewebe, das auch in der Mutterstruktur verwendet wurde.

Eine „Scarf“ Reparatur (Reparatur mit bandförmigen Flicken) kann die beste Wahl bei Delamination in Holmgurten, anderen Schäden im Betrieb oder Herstellungsfehlern (Faserwelligkeit und trockene Stellen) sein (Mishnaevsky 2019).

Abbildung 41: Band Reparatur (engl. Scarf).



Quelle: Eigene Darstellung, Fraunhofer-ICT, nach Mishnaevsky (2019).

Ein kritischer Punkt bei der Reparatur der Rotorblätter ist, dass die Menge an Informationen, die von Rotorblatt-Herstellern veröffentlicht wird, oft nicht ausreichend ist, um sicherzustellen, dass die Wartung korrekt durchgeführt wurde. Das bedeutet, dass die Wartungsteams ohne Unterstützung durch Konstruktions- und Fertigungsinformationen über den besten Reparaturweg entscheiden müssen. Dies muss mit dem Wissen kombiniert werden, das für die Verarbeitung von Verbundwerkstoffen erforderlich ist sowie mit der Fähigkeit, unter exponierten Bedingungen zu arbeiten. Die Verwendung dieser Materialien erfordert auch Zeit für eine Reparatur, da die Harze gemischt und aufgetragen und unter Verwendung von Wärme gehärtet und geschliffen werden müssen. Ein Zyklus, der viele Stunden dauern kann (Bellamy 2014).

2.2.8 Prüfung von Rotorblättern

Der Hauptgrund für das Testen von Materialien, Komponenten und Strukturen im Originalmaßstab ist die Design-Validierung.

Die Entwicklung der Modelle erfordert eine ausreichende experimentelle Basis für wissenschaftliche Beobachtungen. Die Modelle müssen mit Eingangsdaten für die Kalibrierung von Materialfaktoren und Materialeigenschaften ergänzt werden, um das Strukturverhalten in allen vorhersehbaren Situationen genau und zuverlässig vorherzusagen (Nijssen und Winkel 2016).

In der Praxis beginnt die Designphase eines Rotorblatts mit der Auswahl des Materials. Zu diesem Zweck können Werkstoffe ausgewählt werden (z. B. auf der Grundlage von Verfügbarkeit oder Kosten). Eine Auswahl dieser Materialien wird dann einem standardisierten Materialtest unterzogen. Für ein typisches Rotorblatt können ca. 5 bis 10 Materialien einem solchen Testprogramm unterzogen werden, wobei die Materialien mehreren verschiedenen quasistatischen Tests (z. B. Zug, Druck, Scherung in der Ebene, interlaminare Scherung) unterzogen werden. Jeder dieser Tests ist standardisiert, um eine vorgeschriebene Beschreibung der Materialparameter zu erhalten (typischerweise ein Spannungs-Dehnungs-Diagramm) (Nijssen und Winkel 2016).

Von den besten Ergebnissen werden dann oft einige Materialien im Ermüdungstest geprüft. Insgesamt kann ein Materialprüfprogramm, das im Rahmen einer Schaufelzertifizierung durchgeführt wird, bis zu 500 Einzelprüfungen betragen und einige Monate dauern.

Ein Subkomponententest ist ein mechanisches Experiment an einem isolierten Teil der Struktur, bei dem Versagensmechanismen erwartet werden (oder aus der Erfahrung mit Schaufeln in Originalgröße bekannt sind). Dieser verfolgt das Ziel, diese Versagensmechanismen abzuleiten und etwas über ihr Verhalten zu lernen. Typischerweise handelt es sich dabei um strukturelle Details, für die (numerische) Modelle ihr Verhalten nicht genau vorhersagen können (Nijssen und Winkel 2016).

Die Teilkomponenten-Prüfung ist damit einen höchst notwendiger Zwischenschritt zwischen Material- und Vollmaßstabs-Prüfung.

Die relevantesten Tests für Rotorblätter in Originalgröße sind erstens die statischen Tests, einschließlich Lastaufbringung mit hydraulischen Winden. An zweiter Stelle stehen die dynamischen Rotorblatttests mit blattbasierten Anregungssätteln oder bodengebundenen Erregern. Zuletzt kann noch die Bestimmung der Eigenfrequenzen des Rotorblatts getestet werden.

2.3 Vorgehen und Ergebnisse zur Erhebung des WEA-Bestandes

2.3.1 Eignung des Marktstammdatenregisters (MaStR) für die Abschätzung des WEA-Bestands

Das Marktstammdatenregister (MaStR) der Bundesnetzagentur wurde als Grundlage zur Erarbeitung des Überblicks der in Deutschland existierenden WEA, Rotorblattkonstruktionen und der Abschätzung der zu erwartenden Mengenströme und deren Materialien aus Rückbau und Repowering herangezogen (MaStR 2020a). Das MaStR ist das behördliche Register für Strom- und Gaserzeugungsanlagen und beinhaltet u. a. Stammdaten zu den WEA in Deutschland. Diese Daten sind öffentlich zugänglich, für die Nutzung freigegeben und befinden sich gerade in Überarbeitung. Die Pflicht zur Angabe der Daten für neue und bestehende Anlagen liegt bei deren Betreibern, die ebenfalls für die Aktualität der Daten verantwortlich sind. Die verpflichtend einzutragenden Stammdaten der registrierten Anlagen umfassen neben Namen, Adressen und Standorten auch Technologien und Leistungswerte (MaStR 2020d).

Zurzeit existieren noch zwei voneinander unabhängige Datenbanken, welche über die Website des Markstammregisters aufgerufen werden können. Die erste Datenbank „Aktuelle Einheitenübersicht“ beinhaltet ausschließlich geprüfte und registrierte Stromerzeugungseinheiten (SEE) und liefert eine komplettierte Übersicht; jedoch mit eingeschränkten Detailinformationen zu registrierten SEE.

Im Gegensatz dazu stellt die zweite Datenbank „Erweiterte Einheitenübersicht“ zum Teil auch Informationen zu Anlagendetails (Typenbezeichnung, Nabenhöhe, Rotorblattdurchmesser) sowohl von (SEE) als auch von noch nicht registrierten Einheiten, sogenannten Strom migrierten Einheiten (SME), welche noch keinem Betreiber zugeordnet sind, bereit. Ziel der Bundesnetzagentur ist es, bestehende Datenlücken der erweiterten Ansicht zu schließen, sukzessive alle SME in SEE zu überführen, und veraltete Einträge zu löschen. Die Bundesnetzagentur ermöglicht es, Datenbankauszüge des MaStR zu erstellen und diese Datenauszüge für weitere Analysen zu nutzen (MaStR 2020b).

Für die Recherche und Ermittlung des zu erwartenden Aufkommens an Altrotorblättern in Deutschland bis 2040 wurde ein Datenauszug der erweiterten Einheitenübersicht aus dem Marktstammdatenregister im Juli 2020 entnommen. Dabei wurden alle bereitgestellten Benutzungshinweise der erweiterten Einheitenübersicht, z. B. das Setzen des „Statistik Filters B“ zur Vermeidung von Doppelzählungen, befolgt (MaStR 2020c).

Im erzeugten Datenbankauszug sind alle in Betrieb befindlichen WEA aus dem Marktstammdatenregister enthalten. Basierend auf den durchgeführten Recherchen und Analysen erscheinen bei der Vielzahl von Anlagen, Standorten und standortspezifischen Ausführungen insbesondere die folgenden Eigenschaften für die Abschätzung der zu erwartenden Rotorblattabfallmengen relevant, da daraus Rückschlüsse auf die Rotorblattlänge, die Leistungsparameter der Rotorblätter und deren Alter sowie auch das regionale Aufkommen der Rotorblätter möglich sind:

- WEA-Hersteller, WEA-Typ
- Nennleistung, Rotordurchmesser, Nabenhöhe
- Datum der Inbetriebnahme
- Standortgemeinde, Postleitzahl, Bundesland, Standortkoordinaten (GPS).

Damit eignet sich das MaStR in der erweiterten Einheitenübersicht, um den Anlagenbestand von WEA in Deutschland zu analysieren und über Angaben zu Herstellern und Typenbezeichnungen die verwendeten Rotorblatttypen abzuleiten. Ausgehend von den installierten Rotorblättern können in einem zweiten Schritt die verwendeten Materialien und deren Mengenströme im Rückbau abgeschätzt werden.

Bei der Analyse des Anlagebestands wurden nur registrierte Windenergieeinheiten betrachtet, die zum Zeitpunkt des Datenabzugs (16.07.2020) in Betrieb waren. Durch die verwendeten Filter wurden der Datenauszug und der betrachtete Anlagenbestand auf 30.167 WEA beschränkt (vgl. Tabelle 10). Zusätzlich wurde manuell geprüft, ob weitere Doppelzählungen enthalten waren, und diese gegebenenfalls bereinigt. Im Datensatz sind 1.497 WEA auf See und 28.670 WEA an Land enthalten, die im Juli 2020 in Betrieb waren.

Tabelle 10: Untersuchte WEA im Auszug des Marktstammdatenregisters in Deutschland.

WEA	Stand: 16. Juli 2020
WEA auf See (davon 1.330 in ausschließlicher Wirtschaftszone)	1.497
WEA an Land	28.670
Betrachtete WEA (See und Land; in Betrieb)	30.167

Quelle: Eigene Zusammenstellung, KIT-IIP.

Zur Klärung der Fragestellung, wie gut dieser Datenbestand den tatsächlichen Bestand an WEA in Deutschland beschreibt, wurden weitere Studien und Datenbanken herangezogen und ausgewertet. Die Vergleichbarkeit ist hierbei immer nur teilweise gegeben, da sich die jeweilige Datenbasis in der Regel auf unterschiedliche Zeitpunkte bezieht und unterschiedliche regionale Schwerpunkte vorliegen können. Tabelle 11 zeigt eine Übersicht der zum Vergleich und zur Plausibilisierung herangezogenen Studien und Datenbanken sowie dem darin aufgeführten WEA-Bestand.

Tabelle 11: Vergleich von Datenbanken und Studien zur Anzahl von WEA (in Betrieb) in Deutschland.

Studie / Datenbank	Anlagenbestand Deutschland	Zeitlicher Bezug	Regionaler Bezug	Quelle
Bundesverband WindEnergie e. V.	30.295	Februar 2020	Deutschland	Windenergie 2020c
WP-DeutschlandDB des Ramboll-Konzerns	27.434 (ca. 30.000*)	Anfang 2018 (2020)	Deutschland	Zotz et al. 2019 (*:geschätzt)
The Wind Power Net	10.824	Ende 2019	Weltweit	The Wind Power 2020b

Quelle: Eigene Zusammenstellung, KIT-IIP.

Aus dem Vergleich wird deutlich, dass die verschiedenen Datenquellen zum deutschen WEA-Bestand einen ähnlichen Anlagebestand abbilden. Es besteht allerdings ein deutlicher Unterschied zu der Datenbank „The Wind Power Net“, die den weltweiten WEA-Bestand abbildet. Zudem ist auf die zeitlichen Unterschiede und regionalen Schwerpunkte der Datengrundlagen hinzuweisen. Ausgehend von dem vergleichbaren Anlagebestand der

unterschiedlichen Quellen wird der erstellte Datenabzug des MaStRs als geeignet für die folgenden Analysen angesehen.

2.3.2 Analyse der vorhandenen WEA-Daten des Marktstammdatenregisters

2.3.2.1 Datenlücken

Ausgehend von den WEA des MaStR wurden nun die im Bestand verwendeten Rotorblätter und damit die verwendeten Materialien und deren Mengenströme im Rückbau und Repowering abgeschätzt. Wie bereits beschrieben, sind insbesondere die Eigenschaften des WEA-Typs, der Rotorblattlänge, des Rotorblattumfangs und -gewichts, der Nennleistung, des Alters und des Standorts dafür relevant. Da die Eintragung der Stammdaten in das MaStR durch den Betreiber der jeweiligen Anlage erfolgt, schwankt die Datentiefe und die Datenqualität der einzelnen Einträge teilweise stark. Aus diesem Grund wurde in einem ersten Schritt die Datenqualität des Datensatzes geprüft. Tabelle 12 zeigt eine Übersicht der Datenlücken bei den Eigenschaften der WEA, die als besonders relevant für die Abschätzung des Rotorblattaufkommens bis 2040 eingeschätzt werden.

Tabelle 12: Datenlücken im Auszug „Erweiterte Einheitenübersicht“ des MaStR für die projektrelevanten Eigenschaften.

Eigenschaft	Vorhandene Einträge [Anzahl]	Fehlende Einträge/Datenlücke [Anzahl]	Datenlücke [%]
WEA-Hersteller	10.662	19.499	65%
WEA-Typ	10.723	19.438	64%
Nennleistung	30.167	0	0%
Rotordurchmesser	10.755	19.412	64%
Nabenhöhe	10.742	19.425	64%
Datum der Inbetriebnahme	30.167	0	0%
Standortgemeinde	29.904	257	1%
Postleitzahl	29.573	588	2%
Bundesland	30.167	0	0%
Standortkoordinaten	12.183	17.978	60%

Quelle: Eigene Zusammenstellung, KIT-IIP.

Es lässt sich erkennen, dass einige Angaben immer oder fast immer vorhanden sind, wie die *Nennleistung* der WEA, das *Datum der Inbetriebnahme* sowie der Standort (*Gemeinde*, *Postleitzahl*, *Bundesland*). Besonders groß sind die Datenlücken bei den Angaben der WEA-*Hersteller*, des WEA-*Typs*, des *Rotordurchmessers*, der *Nabenhöhe* und der *Standortkoordinaten*. Besonders sind jedoch die Datenlücken bei den *Herstellerangaben* und den *Typenbezeichnungen* hervorzuheben, da diese Informationen zum Ableiten ebenfalls fehlender Einträge wie *Rotordurchmesser* und *Nabenhöhe* genutzt werden könnten. Ebenfalls ungünstig ist, dass die fehlenden Herstellerangaben auch eine hersteller- und produktbezogene Abschätzung der Marktanteile der verbauten Anlagen und Rotoren im Bestand erschweren. Es wurden daher Wege entwickelt, um diese Datenlücken für die vorliegende Analyse zu schließen, die im

Folgenden beschrieben werden. In Zukunft soll eine überarbeitete Version des MaStR diese Daten bereitstellen.

2.3.2.2 Schließung von Datenlücken

In Abschnitt 2.3.1 wurde auf Registereinträge aus älteren Registern hingewiesen, die in das MaStR migriert wurden. Zur Vermeidung von Doppelzählung wurden diese Einträge beim Datenabzug herausgefiltert. Zur Schließung der Datenlücken bei den Eigenschaften *Hersteller* und *Typenbezeichnung* im MaStR, wurde jedoch auf vorhandene Einträge der Eigenschaften in den älteren Registern zurückgegriffen, die bei der Übertragung der Datensätze in das neuere, webbasierte MaStR verloren gegangen sind. Hierzu wurden geeignete Schlüsselpaare gebildet, um die Informationen zwischen den Registern zu übertragen. Die Eigenschaften, die zu Schlüsselpaaren kombiniert wurden, sind in Tabelle 13 dargestellt. Dabei nimmt die Genauigkeit der Zuordnung mit steigender Schlüsselnummer ab.

Diese automatisierte Verknüpfung von Informationen mittels Schlüsselpaaren wurde durch manuelle Recherche von Windparks und den darin verbauten WEA ergänzt. Manuell nachrecherchiert wurden Eigenschaften aller Windparks mit zehn oder mehr Anlagen. Diese wurden im vorliegenden Datenauszug ergänzt, soweit die gesuchten Angaben zu den WEA in den Windparks im Internet (bspw. auf Webseiten von Windparkbetreibern oder Gemeinden) zu finden waren.

Durch das Kombinieren von Eigenschaften via Schlüsselpaar konnten so 10.546 Datensätze um *Hersteller*- und *Typenangabe* aus älteren Registern ergänzt werden. Mit der nachfolgenden manuellen Recherche konnten weitere 1.654 WEA um die genannten Datensätze erweitert werden, sodass mit dem hybriden Vorgehen bei 12.200 Einträgen (WEA) die *Herstellerangabe* und die *Typenbezeichnung* hinterlegt werden konnte. Damit konnte die identifizierte Datenlücke in den Eigenschaften *Hersteller* und *Typenbezeichnung* von vorher 64 bis 65% auf 24% reduziert werden.

Tabelle 13: Schlüsselpaare zur Verbindung von Informationen aus älteren Registern und dem Auszug des MaStRs.

Schlüssel-nummer	Kombinierte Eigenschaften	Erweiterte Herstellerangaben
1	Bruttoleistung der Einheit, Datum Inbetriebnahme, EEG-Anlagenschlüssel	8.824
2	Bruttoleistung der Einheit, Datum Inbetriebnahme, Postleitzahl, Ort	471
3	Bruttoleistung der Einheit, Datum Inbetriebnahme, Postleitzahl	228
4	Bruttoleistung der Einheit, Datum Inbetriebnahme, Gemarkung	13
5	Datum Inbetriebnahme, EEG-Anlagenschlüssel	270
6	Bruttoleistung der Einheit, Jahr der Inbetriebnahme inkl. Betrachtung der typischen Leistungsklassen	523
7	Bruttoklassen und Einheitentypen	217

Quelle: Eigene Zusammenstellung, KIT-IIP.

Tabelle 14 zeigt, welche Attribute nach der Datenaufbereitung und -ergänzung in welchem Umfang verbessert werden konnten. Dabei konnte insbesondere im Rahmen der aufwändigen manuellen Recherche für Windparks mit 10 oder mehr WEA die Datenlücke weiter geschlossen

werden. Im Anschluss wurden die Hersteller und Typenbezeichnungen manuell vereinheitlicht, sodass fehlende Angaben zum Rotordurchmesser über die Typenbezeichnung recherchiert und ergänzt werden konnten. Zukünftig könnten die Datenlücken durch weitere manuelle Recherche auch der kleineren Windparks (<10 WEA) und von einzelnen WEA oder durch eine verpflichtende Angabe der Daten im MaStR geschlossen werden.

Des Weiteren wird deutlich, dass zwei wichtige Attribute im MaStR fehlen, um das zu erwartende Abfallaufkommen aus Rotorblättern abzuschätzen: das *Individuelle Rotorblattgewicht* und das *Hauptmaterial der Rotorblätter* (bspw. GFK, CFK/GFK, Aluminium oder Balsa-Holz).

Tabelle 14: Datenqualität des MaStR vor und nach der Datenaufbereitung und Ergänzung durch migrierte Datensätze aus älteren Registern sowie durch die Bildung von Schlüsselpaaren und manueller Recherche.

Attribute in MaStR	Absoluter Dateineintrag vorher	Prozentualer Dateineintrag vorher	Absoluter Dateineintrag nacher	Prozentualer Dateineintrag nacher
Hersteller	10.668	35,36 %	22.921	75,98 %
Typ	10.729	35,57 %	22.935	76,03 %
Nennleistung	30.167	100,00 %	30.167	100,00 %
Rotordurchmesser	10.761	35,67 %	22.706	75,27 %
Individuelles Rotorblattgewicht[1]	0	0,00 %	9.169	30,39 %
Hauptmaterial der Rotorblätter[1]	0	0,00 %	22.129	73,35 %
Datum der Inbetriebnahme	30.167	100,00 %	30.167	100,00 %
Bundesland	30.167	100,00 %	30.167	100,00 %
Postleitzahl	29.579	98,05 %	29.579	98,05 %
Ort	29.633	98,23 %	29.633	98,23 %

[1]: Attribut ist nicht verfügbar in MaStR.

Quelle: Eigene Zusammenstellung, KIT-IIP.

2.3.2.3 Marktanteile des WEA-Bestandes

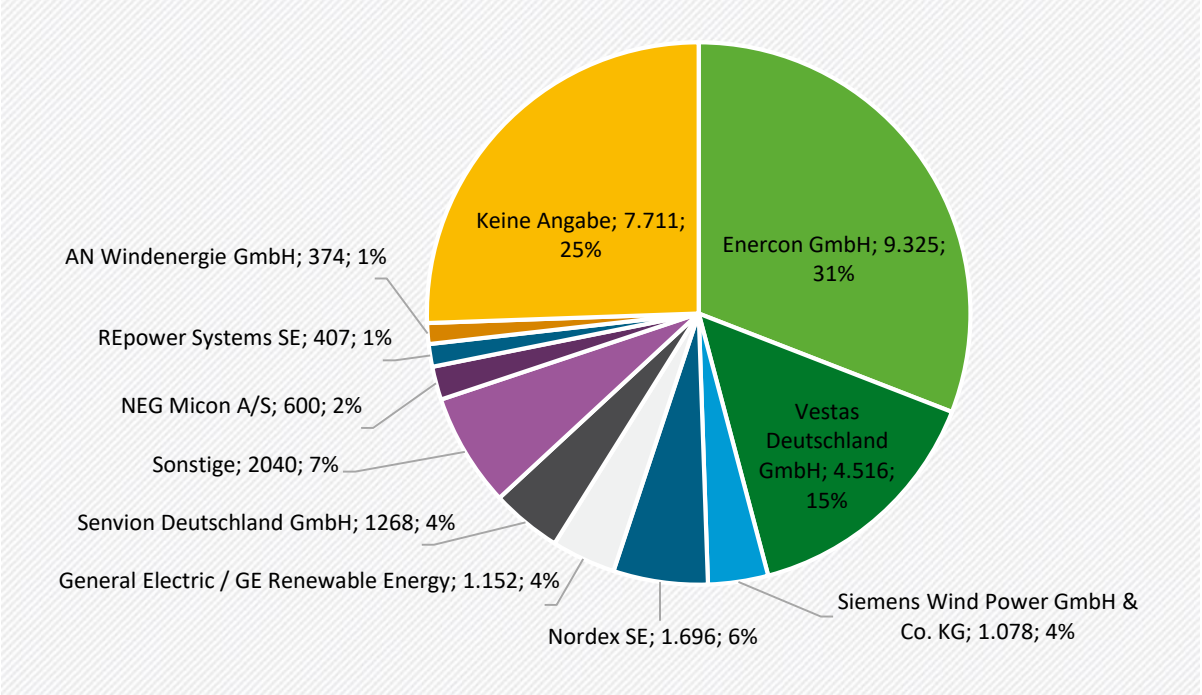
Nach der Datenaufbereitung und der ergänzenden Betrachtung von Übernahmen[2] einzelner Hersteller, konnten fünf WEA-Hersteller identifiziert werden, die den Markt bzw. den aktuell im Betrieb befindlichen Bestand an WEA in Deutschland dominieren. Diese fünf Hersteller haben 73 % der im Betrieb befindlichen Anlagen hergestellt. Es ist anzunehmen, dass der tatsächliche Anteil noch höher liegt, da die Hersteller von über 7.000 Anlagen (ca. 25 %) im MaStR mittels der beschriebenen Methodik nicht ermittelt werden konnten. Eine weitere Verbesserung dieser Einträge im MaStR ist anzustreben, kann aber nur durch verpflichtende Angaben der Hersteller/Betreiber oder durch eine aufwändige manuelle Nachrecherche erreicht werden.

Die meisten installierten WEA in Deutschland sind auf die Hersteller Enercon GmbH (Anzahl: 9325; Anteil: 31 %), Vestas Deutschland GmbH (Anzahl: 4516, Anteil: 15 %), Nordex SE (Anzahl: 1696, Anteil: 6 %), Senvion Deutschland GmbH (Anzahl: 1268; Anteil: 4 %), GE Renewable

[2]Hierzu wurde eine Übersicht übernommener und übernehmender WEA-Hersteller erstellt.

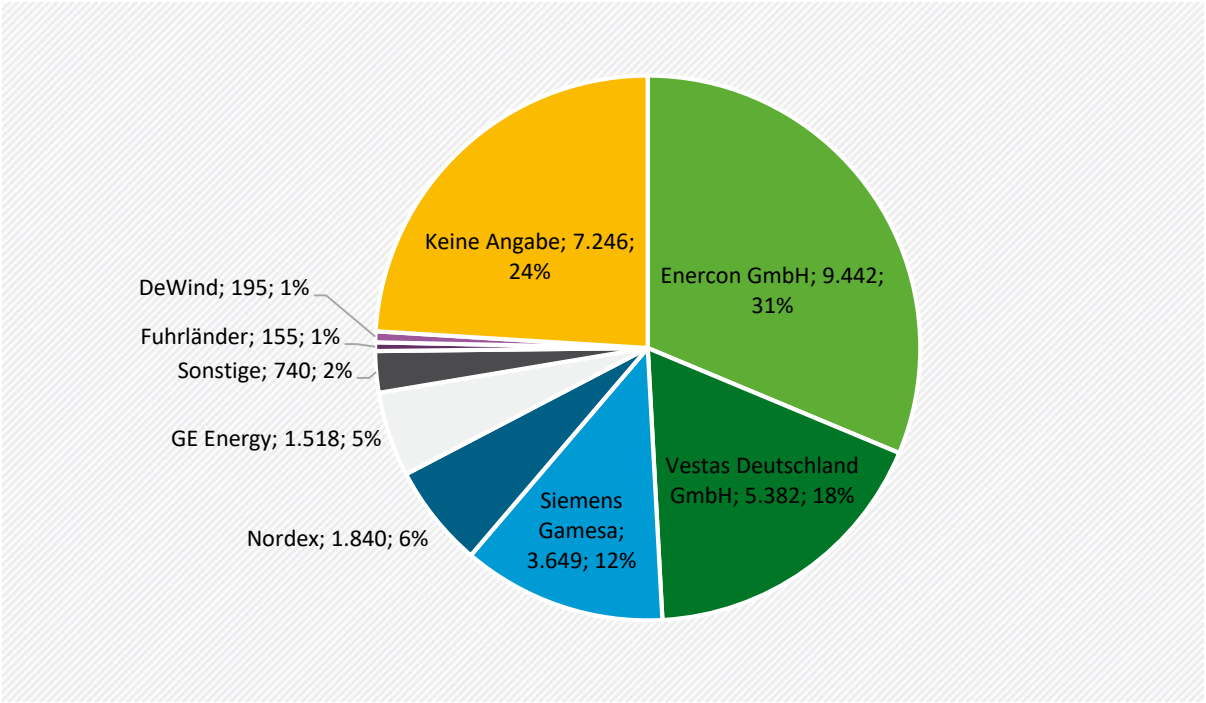
Energy (Anzahl: 1152, Anteil: 4 %) und Siemens Wind Power GmbH & Co. KG (Anzahl: 1078, Anteil: 4 %) zurückzuführen (vgl. Abbildung 42). Betrachtet man die Hersteller unter Berücksichtigung der verschiedenen Herstellerübernahmen der letzten Jahre, ergibt sich ein ähnliches Bild (vgl. Abbildung 43): Auf Enercon GmbH entfällt nach wie vor der Hauptteil der Anlagen (Anzahl: 9.442, Anteil: 31 %). Es folgen Vestas Deutschland GmbH (Anzahl: 5.382, Anteil: 18 %), Siemens Gamesa Renewable Energy S.A. (Anzahl: 3.649, Anteil: 12 %), Nordex SE (Anzahl: 1.840, Anteil: 6 %) und GE Renewable Energy (Anzahl: 1.518, Anteil: 5 %). Circa die Hälfte der WEA (4588 Anlagen) im Alter von älter als 15 Jahren und älter hat besitzen keine Angaben zum Hersteller. Dies entspricht 15,2 % („keine Angabe“). 415 Hersteller werden in der Datenbank als „aufgelöst“ eingestuft.

Abbildung 42: Hersteller (ohne Übernahmen) der in 2020 in Deutschland in Betrieb befindlichen WEA [Anzahl; Anteil].



Quelle: Eigene Darstellung, KIT-IIP.

Abbildung 43: Hersteller (inkl. Übernahmen) der in 2020 in Deutschland in Betrieb befindlichen WEA [Anzahl; Anteil].



Quelle: Eigene Darstellung, KIT-IIP.

Abbildung 44: WEA des MaStR nach Hersteller und Altersklassen (ab 15 Jahren) (Stand: Juli 2020).

	Alter [Jahre]																						
Hersteller	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	37	Gesamtergebnis
keine Angabe	296	357	485	589	543	502	328	238	212	250	341	173	129	57	39	29	9	5	2	1	2	1	4588
ENERCON GmbH	297	391	448	631	409	251	174	145	122	81	67	23	14	6	2	5	1		5	1			3073
Vestas Deutschland GmbH	204	227	364	337	381	224	213	49	88	36	81	39	23	15	8								2289
General Electric / GE Renewable Energy	58	42	104	187	153	85	80	40	10	25	34	24	4	3									849
Nordex SE	61	30	64	104	117	58	110	33	20	11	6	18	9	6									647
Siemens Gamesa Renewable Energy S.A.	21	32	58	76	99	53	61	39	5	9	12	1	11	1	3								481
Senvion Deutschland GmbH	32	42	110	128	78	23	20	3					1				1	1					439
DeWind GmbH	6	4	13	12	45	66	36	8		1													191
Fuhrländer AG	25	13	3	7	8	2		3		2	2	1	2										68
Frisia Windkraftanlagen Produktion GmbH					32		8																40
Lagerwey						10	4			1	1	1		2	2	2							23
Pfleiderer Wind Energy GmbH		1	17		1																		19
SEEWIND Windenergiesysteme GmbH						1		1			1	5											8
Krogmann GmbH & Co. KG			1																				1
Bettink	1																						1
InVentus Energie GmbH										1													1
Sonkyo Energy					1																		1
VENSYS Energy AG			1																				1
Ventis Energietechnik GmbH														1									1
Wind Technik Nord GmbH													3										3
Sonstige			2	1		3	10	1					2										19
Gesamtergebnis	1001	1139	1670	2072	1867	1278	1044	560	457	417	545	285	198	91	54	36	11	6	7	2	2	1	12743

Quelle: Eigene Darstellung, KIT-IIP.

Die Analyse der WEA des MaStR nach Hersteller und Altersklassen zeigt keinen deutlichen Zusammenhang des Alters einer WEA und eines bestimmten Herstellers (vgl. Abbildung 44). Die in Abbildung 42 und Abbildung 43 gezeigten großen Hersteller dominieren auch bei den älteren WEA. Lediglich NEG Micon Deutschland GmbH bildet hier eine Ausnahme. Kleinere Hersteller wie REpower Systems SE, DE Wind GmbH und Tacke GmbH & Co. KG sind mit jeweils ca. 150 WEA in dieser Altersklasse nennenswert.

Insgesamt konnten 527 unterschiedliche WEA-Typen in der MaStR-Datenbank identifiziert werden. Durch die Bereinigung (bspw. unterschiedliche Schreibweisen) konnte diese Zahl auf

492 WEA-Typen reduziert werden. Allein die genannten fünf größten Hersteller kommen auf 236 installierte WEA-Typen, sodass bei einer Vielzahl von WEA-Typen deren verwendete Rotorblätter identifiziert werden müssen. Abbildung 45 zeigt in einer Heatmap exemplarisch aufgeschlüsselt eine Auswertung für die relevanten Konstruktionen, d. h. WEA-Typen von Enercon hinsichtlich WEA-Alter und Häufigkeit im Bestand. In roter Färbung sind einige Cluster von Typ und Alter erkennbar, die besonders häufig in Deutschland installiert sind. Man erkennt auch, dass die Produktion dieser WEA-Typen meist über einige Jahre hinweg stattfand.

Abbildung 45: Beispielhafte Auswertung der WEA-Typen von Enercon nach Alter und Häufigkeit.

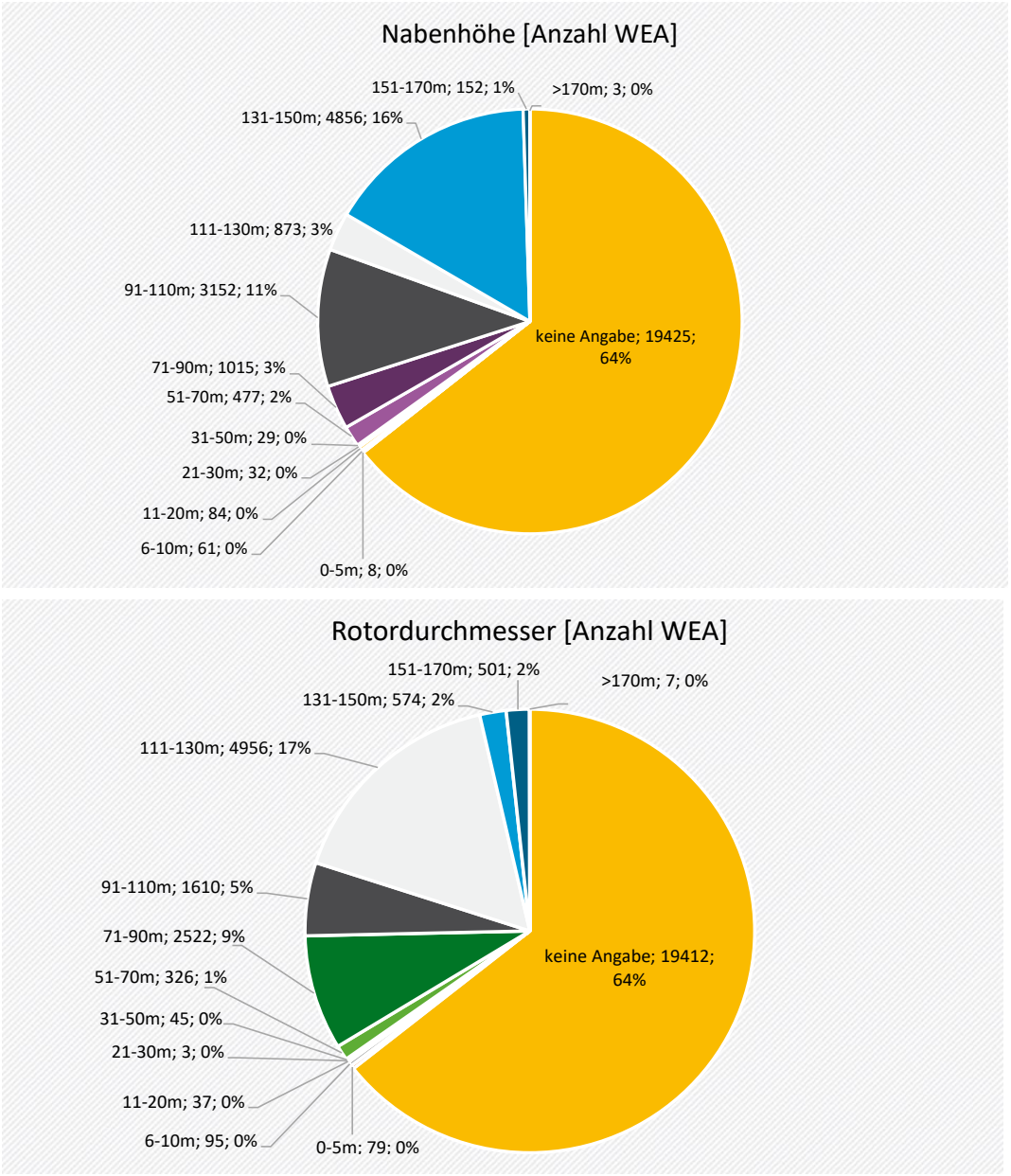
	Alter der WEA [Jahre]																																
Typenbezeichnung	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	33	34	Gesamtergebnis
keine Angabe							7	8					2																						17
E-101	4	9	30	82	125	153	239	144	39	10																									835
E-103		2																																	2
E-112/45.114																			1																1
E-112/60.114														1	1	2	1	1																	6
E-115	18	17	191	320	229	71	10	2	1																										859
E-115 EP2	7	9	1	11																															28
E-126							2	6	14	1	6	3	1	1																					34
E-126 EP3	3	1	2																																6
E-126 EP4	2	1	42	26	1																														72
E-138 EP3	1																																		1
E-138 EP3 E2	1																																		1
E-141 EP4	2	26	68	26																															122
E-16																																	5	1	6
E-17																														2	5	1			8
E-18																								1				3	1						5
E-30																	1		3				3	2	1	1									11
E-32													7	4															2						13
E-33																												2	3						5
E-33/330												1	4	1																					6
E-40/5.40														1					3	3	21	79	92	110	79	65	23	9							485
E-40/6.44										1		3		3	1	14	21	28	160	93	53	19	2	2											400
E-44																		1		3															4
E-48			1	3	4	7	3	2	2	5	14	22	2	6	45	22	3								1										142
E-53	8		1	8	13	35	27	28	28	43	82	60	11	21	1																				366
E-58/10.58													1		5	6	18	45	35	10	4														124
E-66/15.66																		5	27	21	80	73	48	6											260
E-66/18.66																		2	1																3
E-66/18.70															3	25	237	359	399	278	93	3													1397
E-66/20.70										1			1	1	6	14	50	4																	77
E-70 E4 2.000		1						2	1	5	10	117	55	110	196	200	58	3	2	1															761
E-70 E4 2.300	3		9	59	71	36	156	61	88	106	57	92	43	52	37	11										1									882
E-82 E2 2.000						1	17	5	28	26	181	235	38	68	29																				628
E-82 E2 2.300	8	9	22	111	83	118	174	190	321	310	96		1			2	2							1											1448
E-82 E3 3.000					1		6	2	2	5	3	1	3																						23
E-82 E4 2.350	5	3	13	11	4																														36
E-82 E4 3.000												1																							1
E-92	21	13	18	78	72	97	64	3								1																			367
Gesamtergebnis	83	91	398	735	603	518	705	453	524	513	449	535	169	269	324	297	391	448	631	409	251	174	145	122	81	67	23	14	6	2	5	1	5	1	9442

Quelle: Eigene Darstellung, KIT-IIP.

2.3.2.4 Nabenhöhen und Rotorblattdurchmesser des WEA-Bestandes

Die WEA-Typen unterscheiden sich insbesondere hinsichtlich der Nennleistung, der Nabenhöhe und des Rotordurchmessers. Abbildung 46 zeigt die Auswertung des MaStR nach Nabenhöhe und Rotordurchmesser nach der Ergänzung und Vereinheitlichung der WEA-Typen.

Abbildung 46: Datenqualität im MaStR (ohne Datenaufbereitung und –ergänzung) zur Eigenschaft Nabenhöhe (oben) und Rotordurchmesser (unten) der WEA in Betrieb in Deutschland (Stand: Juli 2020).



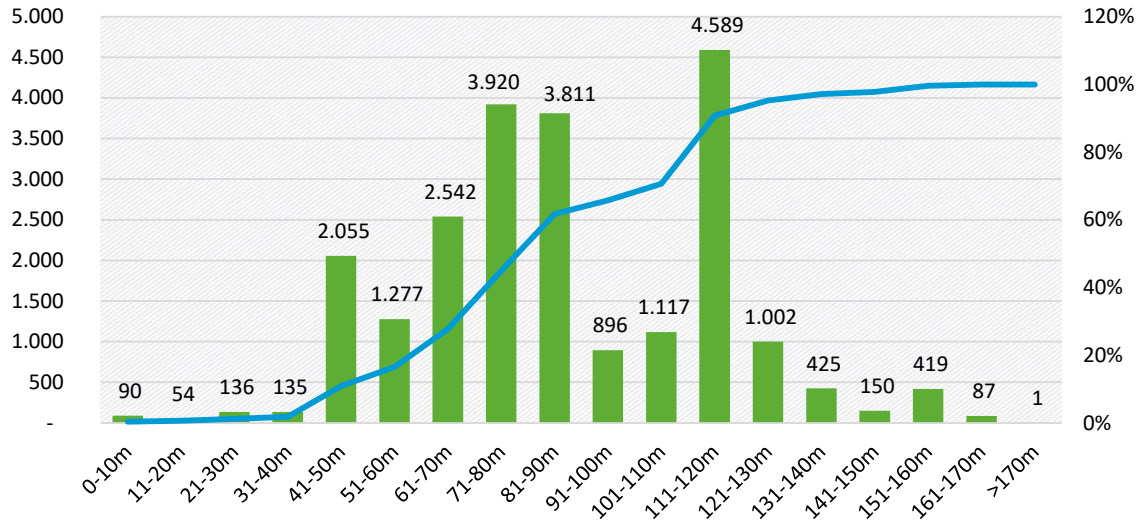
Quelle: Eigene Darstellung, KIT-IIP.

Dabei zeigt sich, dass im Originalauszug des MaStR 64 % der WEA keine Angaben zur Nabenhöhe und zum Rotordurchmesser haben. Durch die Verknüpfung der Schlüsselpaare zu Daten aus älteren Registern und manuelle Recherchen konnte die Datenlücke bei den Rotordurchmessern durch Datenabgleich auf 25 % reduziert werden. Die WEA, für die die Eigenschaften Nabenhöhe und Rotordurchmesser vorliegen, haben vergleichsweise hohe Nabenhöhen (größer als 90 m) und vergleichsweise große Rotordurchmesser mit mehr als 70 m. Dies liegt darin begründet, dass im Gegensatz zu älteren WEA bei neueren (größeren) WEA mehr Angaben im MaStR gemacht wurden.

Bei den installierten Anlagen zeigt sich eine Häufung der Rotordurchmesser zwischen 71 bis 90 m (7.731 WEA; 25,6 %) und 111 bis 130 m (5.591 WEA; 18,5 %) gefolgt von 51 bis 70 m (3.819 WEA; 12,7 %) (Abbildung 47). Bei den vorhandenen Angaben zum Rotordurchmesser

werden im MaStR Werte zwischen 1 m und 180 m angegeben. Die Kleinstanlagen mit einem Rotordurchmesser kleiner als 10 m sind in Tabelle 15 aufgeführt. Acht der 90 WEA sind explizit als Horizontalläufer[3] angegeben; bei den restlichen 82 WEA findet sich kein Eintrag in der Eigenschaft *Technologie der Stromerzeugung*. Bei diesen Anlagen wird von Vertikalläufern[4] ausgegangen, da diese Konstruktionsweise der Standard bei kommerziellen WEA ist.

Abbildung 47: Häufigkeitsverteilung der Rotordurchmesser der WEA in Betrieb in Deutschland.



Quelle: Eigene Darstellung, KIT-IIP.

Tabelle 15: Übersicht der im MaStR aufgeführten Kleinstanlagen (Rotordurchmesser <10m).

Rotordurchmesser	Anzahl	Davon als Horizontalläufer angegeben	Rest (Vertikalläufer)
1 m	8	2	6
2 m	2	0	2
3 m	8	1	7
4 m	7	1	6
5 m	3	1	2
6 m	58	2	56
7,1 m	2	0	2
8 m	1	0	1
10 m	1	1	0
SUMME	**90**	**8**	**82**

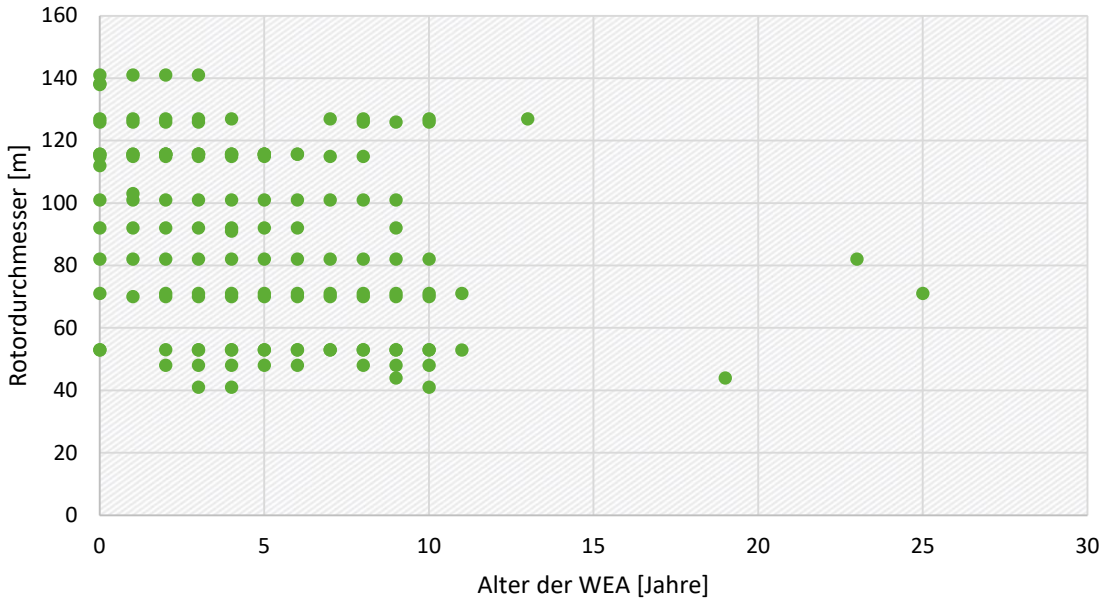
Quelle: Eigene Zusammenstellung, KIT-IIP.

[3]Horizontalläufer sind WEA mit einer vertikalen Achse um die sich die Rotorblätter drehen. Diese Konstruktionsweise findet sich vornehmlich bei kleinen WEA.

[4]Vertikalläufer sind WEA mit einer horizontalen Achse um die sich die Rotorblätter drehen. Diese Konstruktionsweise findet sich bei den meisten WEA.

Weiterhin ist in Abbildung 48 erkennbar, dass bspw. die eingetragenen Enercon-WEA mit Angaben zum Rotordurchmesser vergleichsweise jung sind (<10 Jahre) und ältere Datensätze keine Angaben zum Rotordurchmesser aufweisen. Die Dichte lässt sich aufgrund dieser Darstellungsweise in dieser Abbildung jedoch nicht ablesen.

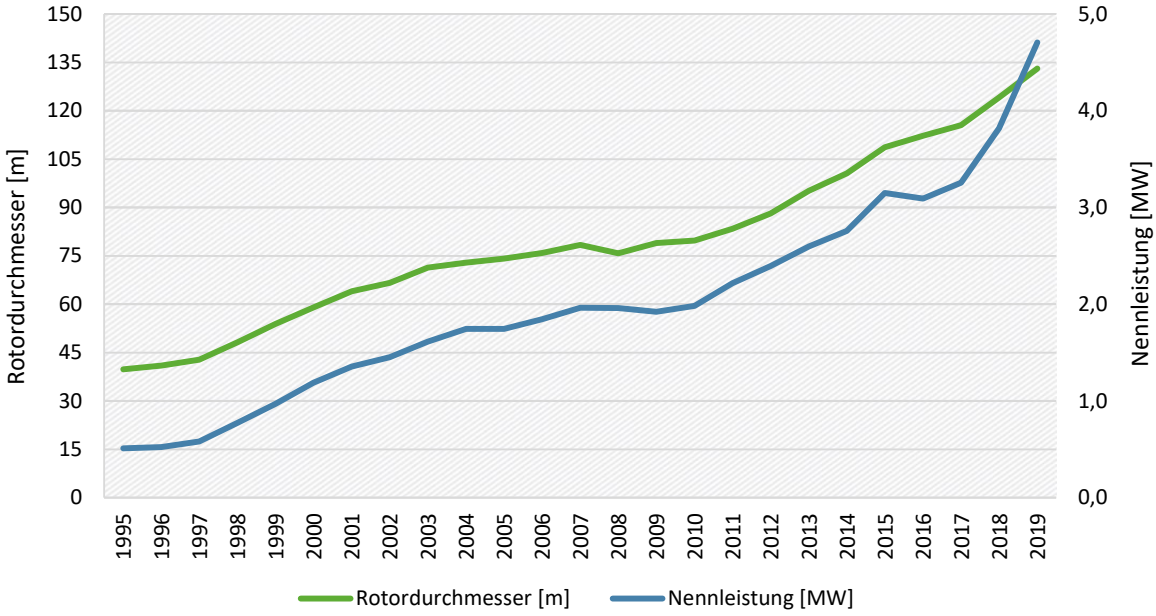
Abbildung 48: Zusammenhang von Angaben im MaStR der Eigenschaften Rotordurchmesser und Alter der WEA in Jahren, hier am Beispiel von Enercon-WEA.



Quelle: Eigene Darstellung, KIT-IIP.

Hinsichtlich des Rotordurchmessers und der Nennleistung lässt sich ein nahezu linearer Zusammenhang erkennen (vgl. Abbildung 49).

Abbildung 49: Entwicklung des durchschnittlichen Rotordurchmessers und der Nennleistung (basierend auf MaStR).



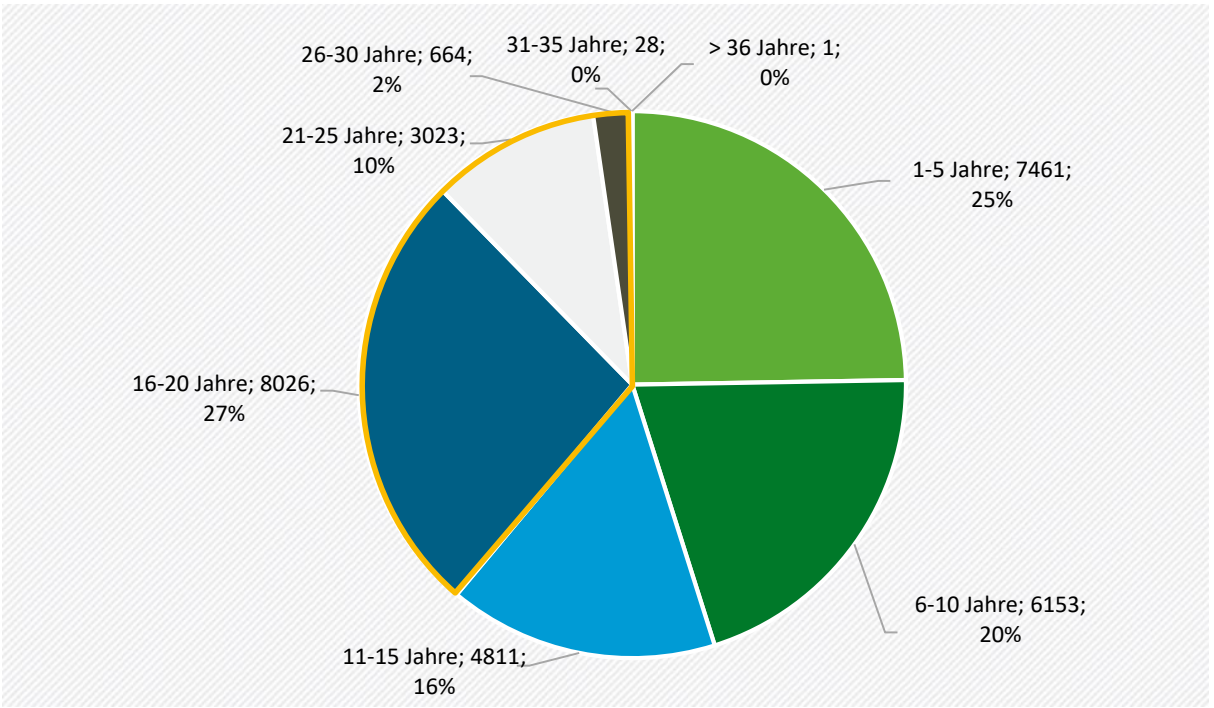
Quelle: Eigene Darstellung, KIT-IIP.

2.3.2.5 Alter des WEA-Bestandes

Auf Basis der Auswertungen des MaStR lassen sich anhand von Pivot-Analysen die häufigsten WEA-Typen, deren Alter und Rotorblattlängen ermitteln. Abbildung 50 und Abbildung 51 zeigen die Altersverteilung der WEA in Betrieb. Die zugrundeliegende Eigenschaft im MaStR-Datensatz ist das verpflichtend anzugebende *Datum der Inbetriebnahme*, welches für alle Anlagen vorhanden ist. 4.994 WEA (17 %) sind dabei 20 Jahre oder älter, d. h. sie werden länger als ihre ursprüngliche geplante technische Lebensdauer (Entwurfslebensdauer) genutzt. Die Entwurfslebensdauer von WEA beträgt i.d.R. 20 Jahre (Berkhout et al. 2013, DIBt-Richtlinie für Windenergieanlagen 2012). 39 % der WEA sind demnach 16 Jahre und älter. Bei diesen Anlagen ist davon auszugehen, dass das Lebensende der Rotoren bald erreicht, wenn nicht gar bereits überschritten ist und an den Anlagen bereits neue Rotorblätter montiert wurden. Das Marktstammdatenregister enthält dazu leider keine Angaben – weder zur Installation der ersten Rotorblätter noch zur Erneuerung von defekten Rotoren, noch zum Austausch leistungsfähigerer Rotoren aufgrund eines Repowerings. Circa ein weiteres Drittel der Anlagen (36 %) ist zwischen 6 bis 15 Jahren alt. Deren Rotorblätter dürften ebenfalls demnächst zur Reparatur und/oder Austausch (d. h. Rückbau und Entsorgung) anstehen. Mit der ermittelten Datenbasis können nun Literaturansätze zur Abschätzung der eingesetzten Materialien genutzt und evaluiert werden, beispielsweise basierend auf Lebensdauerannahmen der Rotorblätter (s. Abschnitt 2.4).

Die ersten Offshore-WEA wurden 2009 in Betrieb genommen. Seitdem kommen jährlich weitere WEA hinzu[5]. Die höchste Anzahl jährlicher Inbetriebnahmen von Offshore-WEA waren bislang im Jahr 2015 zu verzeichnen (547 WEA). Allerdings werden Offshore-WEA aufgrund ihrer vergleichsweise geringen Anzahl in den weiteren Analysen nicht berücksichtigt.

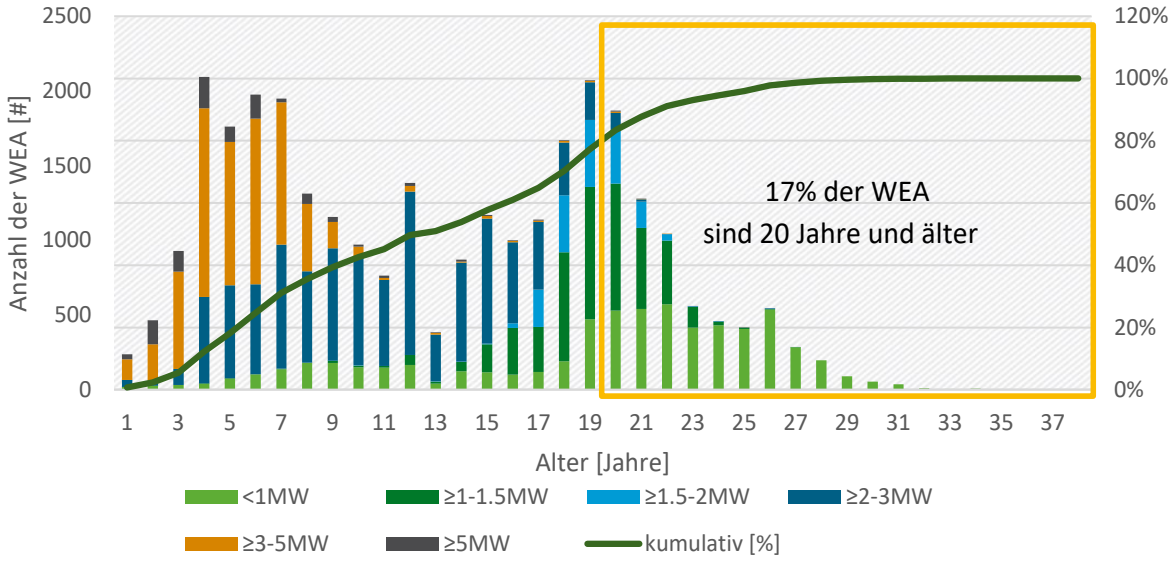
Abbildung 50: Prozentuale Altersverteilung der WEA in Betrieb in Deutschland [Anzahl] [Prozent] (Stand: Juli 2020).



Quelle: Eigene Darstellung, KIT-IIP.

[5]2009: 7; 2010: 9; 2011: 33; 2012: 16; 2013: 48; 2014: 129; 2015: 547; 2016: 156; 2017: 221; 2018: 140; 2019:159; 2020: 32 (vorläufiger Wert für 2020).

Abbildung 51: Häufigkeit und kumulative Altersverteilung [in Jahren] der WEA in Betrieb in Deutschland (Stand: Juli 2020).

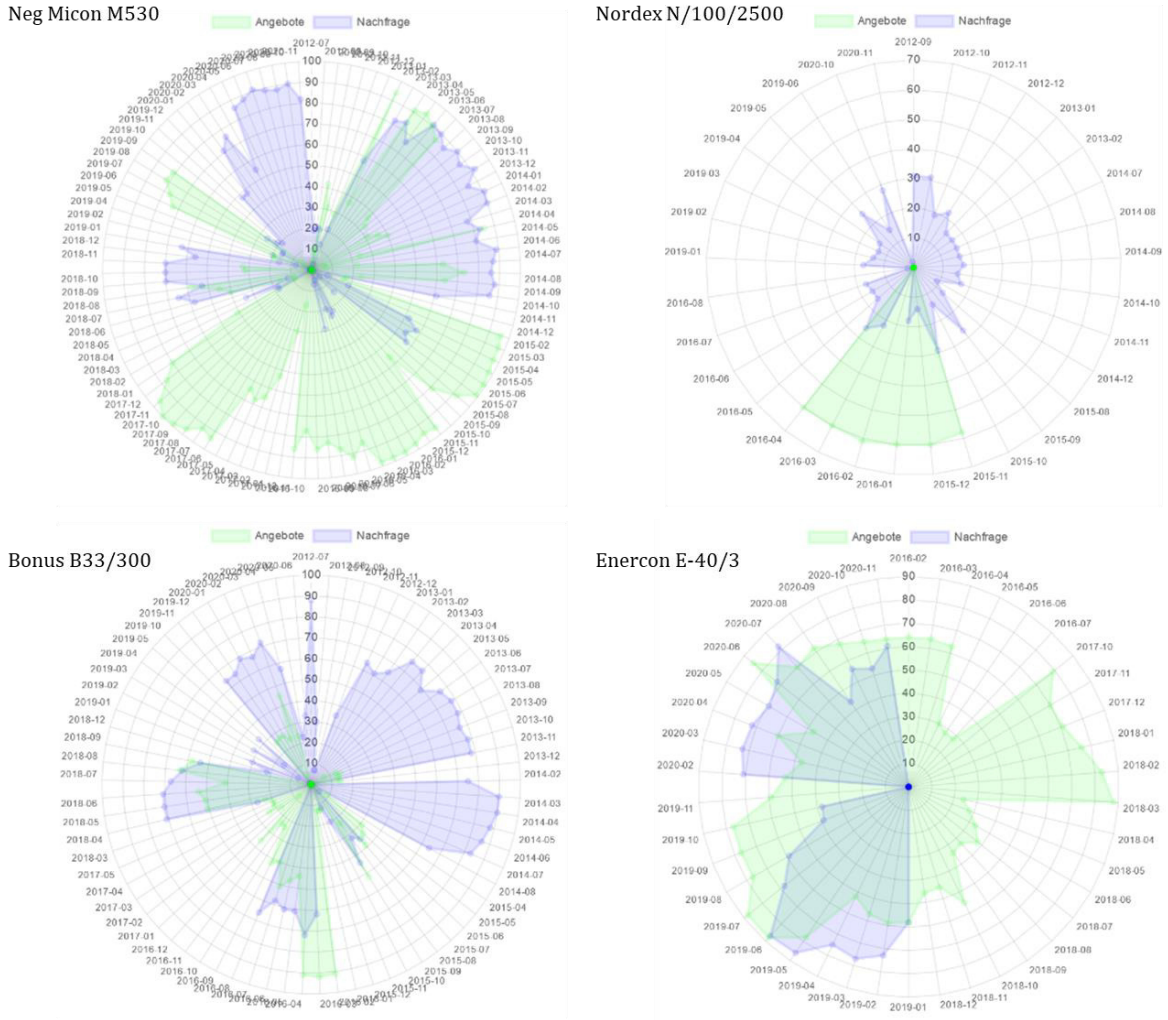


Quelle: Eigene Darstellung, KIT-IIP.

2.3.3 Analyse des Altrotorblattaufkommens

In der Literatur finden sich wenige Angaben zum Altrotorblattaufkommen. Es gibt grundsätzlich die Möglichkeit, den zeitlichen Verlauf des Angebots auf Marktplätzen und Börsen für gebrauchte Altrotorblätter zu verfolgen, um eine Einschätzung für die Wiederverwendung von Altrotorblättern vornehmen zu können. Diese sind allerdings nicht systematisch und in automatisch auswertbarer Form frei abrufbar. Aus den Angeboten auf diesen Plattformen wird jedoch deutlich, dass die Rotorblätter an unterschiedlichen Anlagentypen befestigt werden können. Einzelne Plattformen (bspw. Windturbine 2020a) oder Anbieter (bspw. BayWa r.e. 2020, Nielsen 2020a) bieten gebrauchte Rotorblätter zum Verkauf an. Auf der Plattform ‚wind-turbine' konnten bspw. ca. 500 Einträge zu Rotorblättern gefunden werden; bei Nielsen Wind GmbH wurden zum Zeitpunkt der Recherche ca. 30 Dreiersets an gebrauchten Rotorblättern angeboten (Nielsen 2020b, Stand: 04.12.2020). Rotorblätter werden meist in Dreiersets angeboten. Die Preise dafür variieren zwischen 10.000 € und 385.000 € (Stand: 04.12.2020). Zudem sind Fotos der Rotorblätter, technische Details wie das Baujahr und der Zustand der Rotorblätter sowie der Standort der Rotorblätter angegeben. Die Standorte befinden sich in ganz Europa (bspw. Deutschland, Dänemark, Spanien, Polen) aber auch weltweit (bspw. Indien). Bei einigen Rotorblättern findet sich auf der Plattform auch je nach Rotorblatt bzw. WEA-Typ eine Angebots- und Nachfrageanalyse, die zeitliche Disparitäten hinsichtlich Angebot und Nachfrage sowie auch hinsichtlich der Angebots- und Nachfragemengen zeigt (vgl. Abbildung 52).

Abbildung 52: Zeitliche Angebots- und Nachfrageanalyse von gebrauchten bzw. neuwertigen Rotorblättern des Typs LM 13.4 passend für WEA-Typ Neg Micon M530 (oben links), des Typs N100 passend für WEA-Typ Nordex N100/2500 (oben rechts), des Typs LM 14.2 passend für Bonus B33/300 (unten links) sowie des Typs Enercon E-40/3 (unten rechts) (Stand: 04.12.2020).



Quelle: (Windturbine 2020d, 2020e, 2020b, 2020a).

Beispielsweise sieht man, wie in allen gezeigten Fällen über die Zeit die Menge an Angebot und Nachfrage stark schwankt und auch zeitlich auseinanderklafft. In Abbildung 52 (links oben) bspw. sieht man Rotorblätter des Typs LM 13.4, bei dem Angebot (grün) und Nachfrage (blau) zeitlich stark differieren. Während die Nachfrage in 2013, 2014, 2018 und 2020 bei bis zu 90 Einheiten war, war auf dieser Plattform allerdings vor allem zwischen 2015 bis 2017 ein vergleichbar hohes Angebot vorhanden. Im Fall der Rotorblätter N100 passend für den WEA-Typ Nordex N100/2500 (Abbildung 52, rechts oben) sieht man eine eher zeitlich konstant niedrige Nachfrage bei gleichzeitig zeitlich begrenztem Angebot (in 2015/2016). Es gibt auch Fälle (bspw Abbildung 52, links unten), bei denen die Nachfragemenge (blaue Fläche) die Angebote (grüne Fläche) im betrachteten Zeitraum deutlich übersteigt. Hier ist der Markt im Unterschied zu LM 13.4 (Abbildung 52, links oben) und zu Enercon E-40/3 (Abbildung 52, rechts unten) noch nicht gesättigt, d. h. hier wäre eine Weiternutzung von Rotorblättern im Second-use-Markt aufgrund vorhandener Nachfrage sinnvoll. Man kann auch erkennen, dass das Nachfragelevel der gezeigten Rotorblatttypen in sich auf unterschiedlichem, aber trotzdem relativ niedrigen Level im

Verhältnis zu den installierten WEA bewegt. Eine umfassendere Marktanalyse der Daten dieser Plattform für gebrauchte Rotorblätter könnte mögliche Weiternutzungspotentiale ermitteln.

Allerdings gibt die Plattform keine Auskunft über die regionale Verteilung von Angeboten und Nachfrage sowie über die erforderlichen Transporte und die damit verbundenen Kosten. Dies und weitere Transporthemmnisse könnten einem größeren Second-Use-Markt entgegenstehen. Es wäre zudem für eine umfassendere Marktanalyse hilfreich, wenn solche Plattformen auch darstellen würden, ob und in welchem Umfang es zu Käufen bzw. Verkäufen gekommen ist. Auch wäre eine vereinfachte Suche und Analysefunktion auf solchen Plattformen sinnvoll, um schneller erkennen zu können, ob es auf dem Second-use-Markt Nachfrage für einen bestimmten Typ von Rotorblättern gibt.

2.4 Ergebnisse zur Abschätzung des Abfallaufkommens

Aufbauend auf der in Abschnitt 2.3 beschriebenen Datengrundlage wurden drei Optionen identifiziert, um die verwendeten Rotorblätter und die darin verbauten Materialien sowie das daraus resultierende, zukünftige Abfallaufkommen zu bestimmen. Im Folgenden werden diese drei Optionen vorgestellt, wobei mit absteigender Rangfolge die Genauigkeit der Abschätzung abnimmt. Anschließend wird die erwartete regionale Verteilung des Abfallaufkommens beschrieben (vgl. Abschnitt 2.4.5) und die Granularität der erforderlichen Materialabschätzung diskutiert (vgl. Abschnitt 2.5).

2.4.1 Optionen zur Abschätzung des Materialaufkommens

2.4.1.1 Option A: Kontakt und Befragung der Hersteller, Reparateure, Aufbereiter und Entsorger

Die Kontaktaufnahme zu Herstellern von Windenergieanlagen und Rotorblättern erfolgte zunächst telefonisch und anschließend mit einem Fragebogen bzw. Interviewleitfaden. Hierbei wurden Informationen bezüglich der verbauten Rotorblätter und der darin enthaltenen Materialien direkt von den Herstellern erfragt. Weiterhin wurden Reparateure, Aufbereiter und Entsorger mit dem gleichen Fragenbogen zu den Materialzusammensetzungen der Rotorblätter befragt. Über die strukturierte Befragung der beschriebenen Unternehmen und Ansprechpartner sollten Zusammenhänge zwischen WEA-Typen, Herstellern und eingesetzten Rotorblättern identifiziert werden und die Materialzusammensetzungen und Komponenten einzelner Rotorblätter sowie deren Gewicht erfragt werden. Ein Ziel der Befragung war das Identifizieren eines funktionalen Zusammenhangs zwischen Länge/Gewicht und des verbauten Materials. Mittels dieses funktionalen Zusammenhangs sollte die zu erwartende Abfallmenge aus Rotorblättern auch für die Rotorblätter geschätzt werden, deren direkte Angaben durch die Befragung der Hersteller nicht ermittelt werden konnten.

Die beschriebene Option A weist die höchste Genauigkeit bei der Identifizierung von verbauten Materialien und Mengen auf, da exakte Mengenangaben der Hersteller verwendet wurden. Diese Option ist aber auch maßgeblich von der Kooperationsbereitschaft der Hersteller und anderer kontaktierter Firmen abhängig. Aus diesem Grund werden weitere Optionen vorgestellt, die weniger von der Kooperation der Firmen abhängen.

2.4.1.2 Option B: Clusterbildung

Ausgehend von den aufbereiteten MaStR-Daten können die WEA in Cluster gruppiert werden. Mögliche relevante Eigenschaften zur Clusterung sind beispielsweise das Datum der Inbetriebnahme (hinsichtlich des Alters der WEA und der Rotorblätter), der Rotordurchmesser und/oder die Nennleistung (hinsichtlich der Leistungsmerkmale des Rotors). Die Clustergrenzwerte sind dabei so zu wählen, dass sie sich an Regeln der

Materialzusammensetzung orientieren. Durch die Clusterung kann die Recherche etwas erleichtert werden, da man sich an einem Repräsentanten jedes Clusters orientiert und somit nur Produktdatenblätter bzw. Materialzusammensetzungen von Rotorblättern recherchieren muss, die nahe diesem Clusterrepräsentanten liegen. Dieses Vorgehen entspricht dem Vorgehen von Zotz et al. (2019). Die Clusterung kann insbesondere auch mit möglichen Ergebnissen aus Option A durchgeführt werden, um vertrauliche Herstellerangaben zu anonymisieren.

2.4.1.3 Option C: Regressionsmodelle

In der Literatur existieren verschiedene Modelle, die in Abhängigkeit von den Eigenschaften der Rotorblätter deren Massen abschätzen. Die methodischen Ansätze unterscheiden sich allerdings. Der Großteil der Studien basiert auf installierten Produktionskapazitäten (MaStR-Eigenschaft *Nennleistung*), die mit verschiedenen Faktoren multipliziert werden, um daraus Materialmengen abzuleiten. Andersen et al. (2016), Lichtenegger et al. (2020) und Sommer et al. (2020) arbeiten hingegen mit Regressionsmodellen, die die Rotorblattlänge und das Rotorblattgewicht in Relation zueinander stellen.

Auch unterscheiden sich die in der Literatur berücksichtigten Eigenschaften der WEA, sodass teilweise Unterschiede in der Auslegung der Rotorblätter und der verwendeten Materialien nicht berücksichtigt werden. Insbesondere wird zum Großteil nicht zwischen der Art der Fasern in faserverstärkten Kunststoffen unterschieden. Sommer et al. (2020) bieten einen genauen Überblick über die bestehende Literatur zur Abschätzung von Materialmengen aus Rotorblättern.

Das Vorgehen in Option C orientiert sich an dem Vorgehen von Sommer et al. (2020), da die hier erarbeitete Methodik flexibel auf die Ergebnisse der parallelen Recherche reagieren kann. Informationen zu materialspezifischen Massen für verbaute Rotorblätter und deren Zuordnung zu den identifizierten WEA ermöglichen eine einfache Multiplikation von Faktoren pro Meter Rotorblattlänge. Dabei ist zu beachten, dass bei dieser Rechnung von der MaStR-Eigenschaft *Rotordurchmesser* zunächst der Nabendurchmesser subtrahiert werden muss. Die verbleibende Rotorblattlänge muss dann auf drei Rotorblätter angewendet werden. Da diese meist eine sich verjüngende Struktur haben wäre es besser, mit einem funktionalen Zusammenhang (d. h. einer Regressionsfunktion) als mit einfachen Multiplikationsfaktoren zu arbeiten.

Zudem wurde für die identifizierten WEA das Hauptmaterial ihrer Rotorblätter und deren Gewicht recherchiert, um das von Sommer et al. (2020) erstellte Regressionsmodell, das sich auf die EU-28 Staaten bezieht, auf Deutschland zuzuschneiden. Basierend auf dieser Literaturrecherche und von Regressionsanalysen konnten in Abhängigkeit der Rotorblattlänge die Materialmengen spezifisch für Deutschland bzw. die insbesondere in Deutschland vorherrschenden WEA und deren Rotorblätter abgeschätzt werden. Zudem konnte auf das bestehende Regressionsmodell von Sommer et al. (2020) zurückgegriffen werden und eine vereinfachte Abschätzung der Materialien nach Liu und Barlow (2017), Pehlken et al. (2017) bzw. Albers et al. (2009) hinsichtlich Leistungsklassen und Inbetriebnahme/Herstellung erfolgen. Allerdings je ungenauer die Rechercheergebnisse desto gröber ist die Abschätzung der Materialmengen.

Nachfolgend werden die Abschätzungen des Abfallaufkommens nach Option C im Detail vorgestellt.

2.4.2 Abschätzung des Abfallaufkommens nach Option C (Rechnung 1: Literaturansatz)

Auf Basis der aktuellen Datenlage wurde das rückläufige Material aus dem Rückbau von Rotorblättern bis 2040 mittels Regressionsmodell bestimmt. Hierbei wurden drei Rechnungen

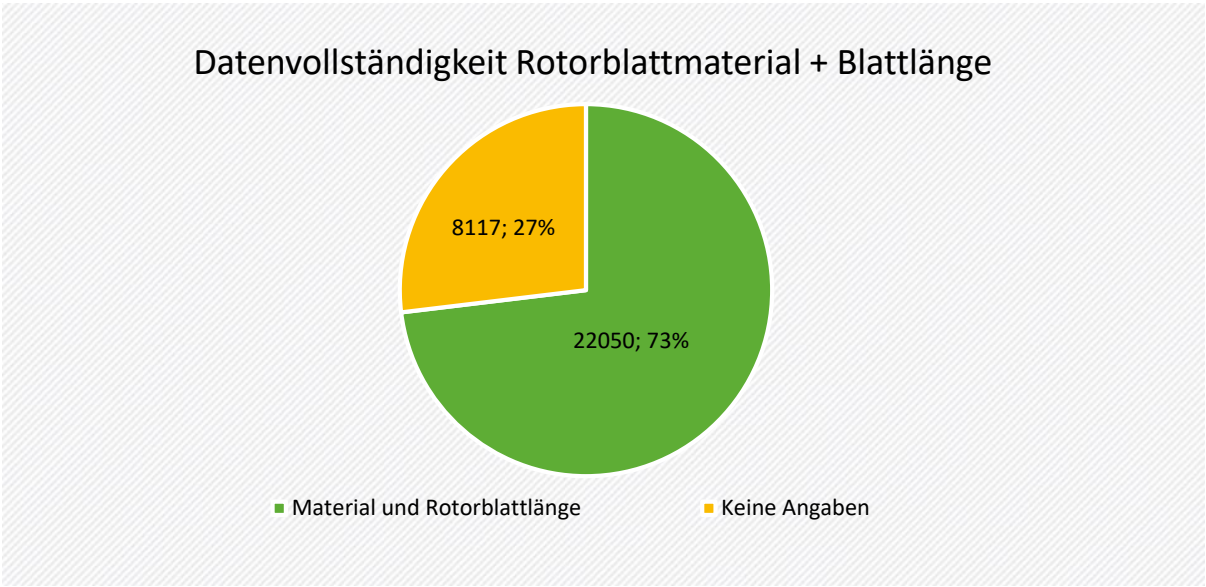
durchgeführt, deren Unterschiede in den einzelnen Unterkapiteln (vgl. Abschnitte 2.4.2 bis 2.4.4) hervorgehoben werden.

Das Vorgehen in Rechnung 1 orientiert sich an dem Vorgehen von Sommer et al. (2020), da die hier erarbeitete Methodik auch mit vorhandenen Datenlücken umgehen kann. Sommer et al. (2020) haben ein Regressionsmodell für die EU-28 Staaten entwickelt, das in Abhängigkeit der Rotorblattlänge das Gewicht des Rotorblatts bestimmt. Dabei unterscheiden die Autoren zwischen Rotorblättern, in denen hauptsächlich GFK verbaut sind und Rotorblättern, die auch CFK enthalten. Es wurden daher zwei unterschiedliche Regressionsfunktionen abgeleitet. Durch die Recherche der Hauptmaterialien der in Deutschland verbauten Rotorblätter können diese Funktionen genutzt werden. Liegt das Hauptmaterial der Rotorblätter nicht vor, dann kann eine vereinfachte Abschätzung der Materialien nach Liu und Barlow (2017) bzw. Albers et al. (2009) hinsichtlich Leistungsklassen und Inbetriebnahme/Herstellung erfolgen.

2.4.2.1 Datengrundlage

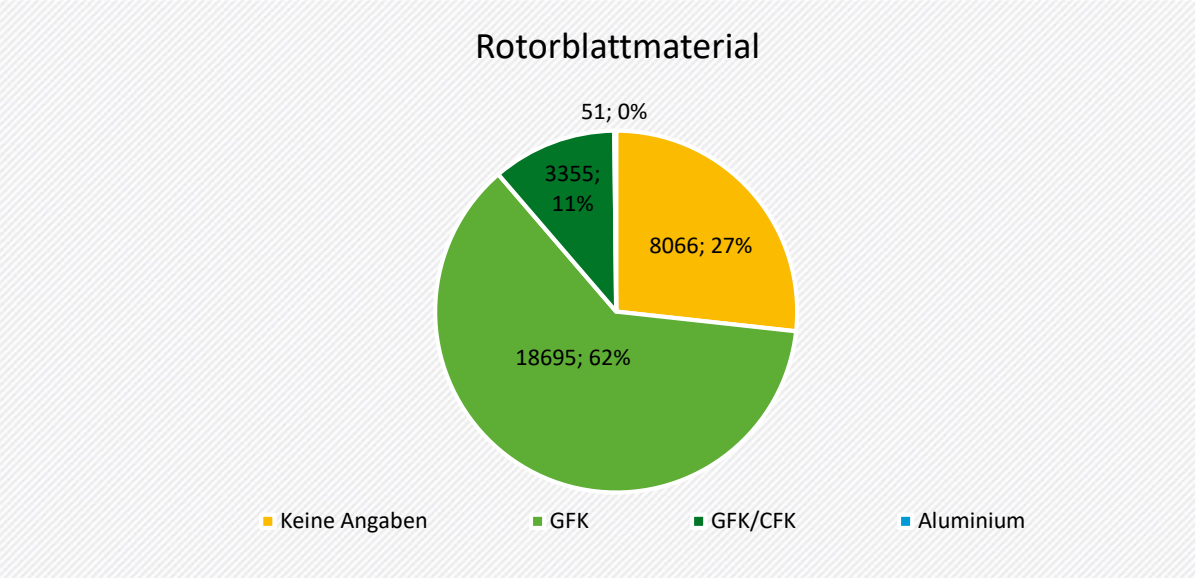
Da die Regressionsfunktionen von Sommer et al. (2020) nur genutzt werden können, wenn das Hauptmaterial der Rotorblätter bekannt ist, wurden in einem ersten Schritt die Daten aus dem MaStR mit Daten von Sommer et al. (2020) verschnitten und mit Ergebnissen manueller Recherche ergänzt. Wie in Abbildung 53 dargestellt, konnte so für 22.050 Anlagen das Hauptmaterial und die Rotorblattlänge identifiziert werden. Für diese Anlagen kann demnach eine der beiden Regressionsfunktionen von Sommer et al. (2020) genutzt werden. Die rückläufige Materialmenge der verbleibenden 8.117 Anlagen wurde mittels ihrer Leistungsklasse nach Liu und Barlow (2017) abgeschätzt. Abbildung 54 stellt das Ergebnis der Zuordnung der im MaStR registrierten WEA und ihrer Rotorblätter zu den relevanten Hauptmaterialien dar. Daraus wird ersichtlich, dass der Großteil der Rotorblätter aus GFK gefertigt wurde und nur in einem Anteil von 11% der WEA auch CFK in den Rotorblättern enthalten ist.

Abbildung 53: Datenvollständigkeit des ergänzten MaStR Datensatzes hinsichtlich der beiden Eigenschaften Rotorblattmaterial und Rotorblattlänge, der der nachfolgenden Regression zugrunde liegt.



Quelle: Eigene Darstellung, KIT-IIP.

Abbildung 54: Anteile der Rotorblattmaterialien je WEA auf Basis der MaStR-Daten und der Hauptmaterialien der Rotorblätter (Rechnung 1).



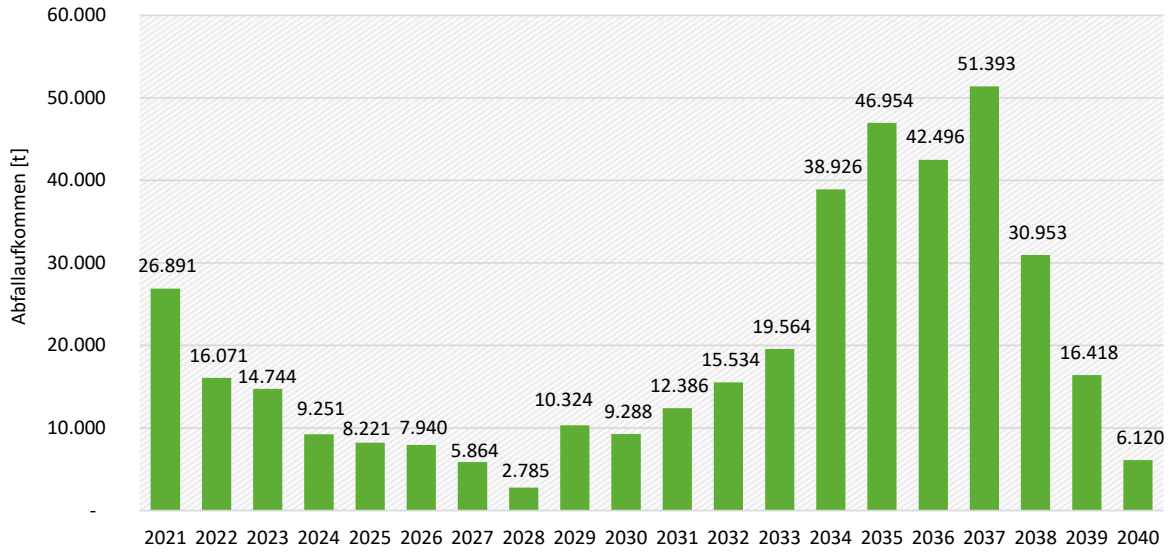
Quelle: Eigene Darstellung, KIT-IIP.

2.4.2.2 Berechnung der Materialmengen nach den Materialklassen GFK und GFK/CFK

Im Folgenden werden die daraus resultierenden, prognostizierten Abfallmengen für die jeweilige Materialklasse GFK bzw. GFK/CFK dargestellt. Zunächst werden nur die Rotorblätter betrachtet, die klar einer dieser beiden Klassen GFK und GFK/CFK zugeordnet werden konnten. In einem zweiten Schritt werden auch die Rotorblätter aufgenommen, die durch das Schließen der Datenlücke über die Leistungsklassen in eine der beiden Materialklassen fallen.

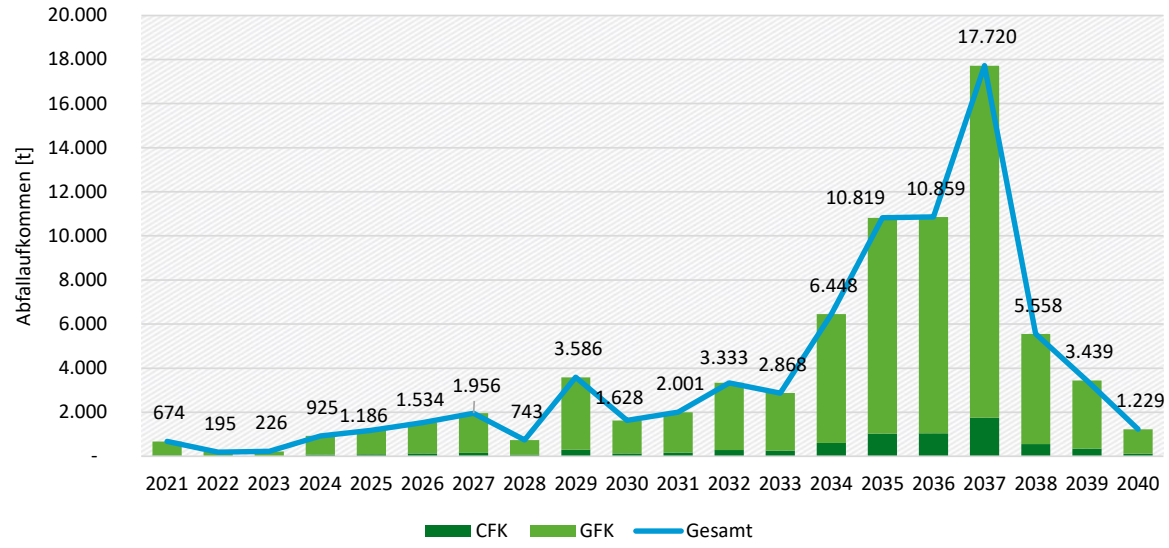
Betrachtet man nur die Rotorblätter, die eindeutig der Materialklasse GFK zugeordnet werden konnten, dann fallen über die nächsten 20 Jahre 392.124 t Verbundwerkstoffe mit GFK an. Abbildung 55 zeigt den zeitlichen Verlauf des prognostizierten Abfallaufkommens an GFK in den Jahren von 2021 bis 2040. Die Mengen wurden mittels des Regressionsmodells von Sommer et al. (2020) bestimmt. Dabei wurde angenommen, dass die Lebenserwartung eines Rotorblatts dem einer WEA entspricht und bei 20 Jahren liegt. Zusätzlich wurde angenommen, dass Rotorblätter und Anlagen, die derzeit in Betrieb und älter als 20 Jahre sind, im Jahr 2021 zurückgebaut werden und dass keine alten WEA in einen Second-Use-Markt gehen.

Abbildung 55: Abfallprognose der Verbundwerkstoffe aus der GFK Materialklasse; kumulierte Abfallmenge: 392.124 t (Rechnung 1, Materialklasse).



Quelle: Eigene Darstellung, KIT-IIP.

Abbildung 56: Abfallprognose der Verbundwerkstoffe aus der GFK/CFK Materialklasse; kumulierte Abfallmenge: 76.927 t (Rechnung 1, Materialklasse).



Quelle: Eigene Darstellung, KIT-IIP.

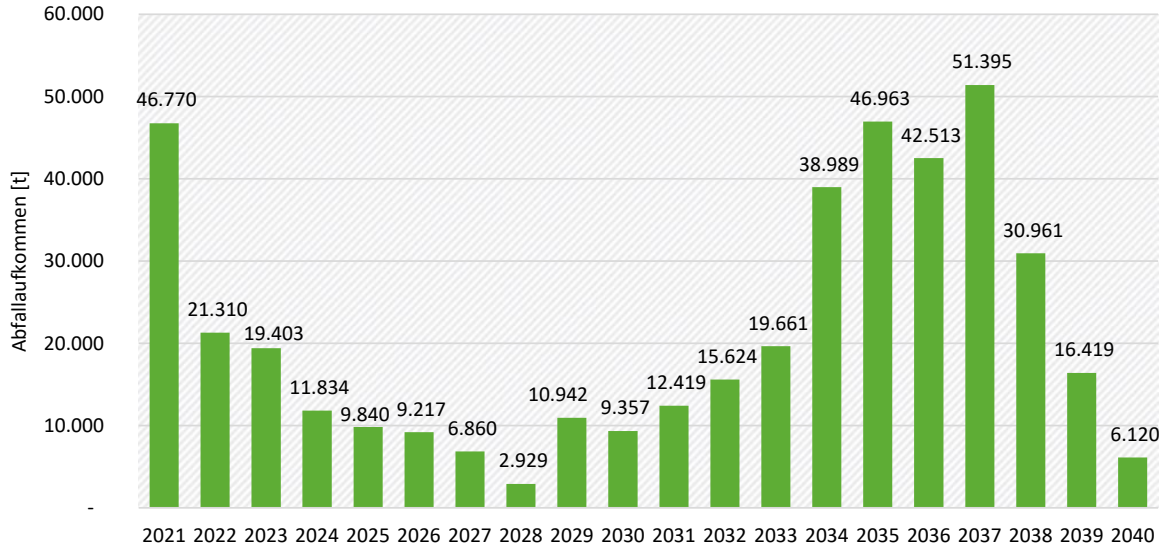
Betrachtet man die Rotorblätter, die eindeutig der Materialklasse GFK/CFK zugeordnet werden konnten, dann fallen über die nächsten 20 Jahre 76.927 t Verbundwerkstoffe mit GFK und CFK an. Die Methodik von Sommer et al. (2020) erlaubt die Unterscheidung der Gesamtmenge nach Fasertyp. Demnach beinhaltet die Gesamtmenge 7.188 t Verbundwerkstoffe mit CFK und 69.739 t Verbundwerkstoffe mit GFK. Auch in dieser Rechnung wurde angenommen, dass die Lebenserwartung eines Rotorblatts bei 20 Jahren liegt und dass Rotorblätter, die derzeit in Betrieb und älter als 20 Jahre sind, im Jahr 2021 zurückgebaut werden. Abbildung 56 zeigt den zeitlichen Verlauf des Abfallaufkommens aus der Materialklasse GFK/CFK für die Jahre 2021 bis 2040. Es ist hervorzuheben, dass lediglich 11 % der WEA und ihrer Rotorblätter nach der beschriebenen Methodik dieser Materialklasse zugeordnet werden. Der CFK-Anteil am

Gesamtgewicht der Rotorblätter beträgt durchschnittlich 7 % und liegt damit 2 Prozentpunkte über den 5 % von Sommer et al. (2020).

Erweitert man die Datengrundlage um die Rotorblätter, deren Hauptmaterial nicht identifiziert werden konnte, sondern die mittels Leistungsklasse betrachtet wurden, dann erhöhen sich die prognostizierten Abfallmengen in den jeweiligen Materialklassen. Für die Leistungsklassen nach Liu und Barlow (2017) wurde pro Klasse ein Parameter für das Abfallaufkommen pro installierter Leistung festgelegt. Das Abfallaufkommen wird mit materialspezifischen Parametern den einzelnen Fraktionen zugeordnet. Sommer et al. (2020) nehmen dabei an, dass Anlagen, die vor dem Jahr 2001 gebaut wurden, kein CFK enthalten und nach dem Jahr 2001 CFK nur in den Größenklassen ab 1,5 MW verbaut wurde.

Unter Einbeziehung der Materialabschätzung nach Leistungsklassen erhöht sich die rückläufige Menge an GFK-Verbundwerkstoffen aus der Materialklasse GFK um 37.400 t auf eine Gesamtmenge von 429.525 t. Abbildung 57 zeigt den zeitlichen Verlauf des Abfallaufkommens aus der Materialklasse im Zeitverlauf über die Jahre von 2021 bis 2040. In die Abschätzung wurden nur Mengen aus Rotorblättern aufgenommen, die nach der Zuordnung zu einer Leistungsklasse und auch entsprechend ihres Alters kein CFK enthalten.

Abbildung 57: Abfallprognose der Verbundwerkstoffe aus der GFK Materialklasse; kumulierte Abfallmenge: 429.525 t. (Rechnung 1, Material- und Leistungsklassen).



Quelle: Eigene Darstellung, KIT-IIP.

Abbildung 58: Abfallprognose der Verbundwerkstoffe aus der GFK/CFK Materialklasse; kumulierte Abfallmenge: 170.872 t (Rechnung 1, Material- und Leistungsklasse).

Quelle: Eigene Darstellung, KIT-IIP.

Unter Einbeziehung der Materialabschätzung nach Leistungsklassen, erhöht sich die rückläufige Menge an GFK/CFK-Verbundwerkstoffen aus der Materialklasse GFK/CFK um 93.945 t deutlich auf eine Gesamtmenge von 170.872 t. Die Gesamtmenge beinhaltet 10.816 t Verbundwerkstoffe mit CFK und 160.056 t Verbundwerkstoffe mit GFK. Abbildung 58 zeigt den zeitlichen Verlauf des Abfallaufkommens aus der Materialklasse GFK/CFK für die Jahre 2021 bis 2040. In die Abschätzung wurden nur Mengen aus Rotorblättern aufgenommen, die nach der Zuordnung zu einer Leistungsklasse und auch entsprechend ihres Alters CFK enthalten können. Dadurch steigt der Anteil an WEA und deren Rotorblättern mit verbautem CFK auf 21 %.

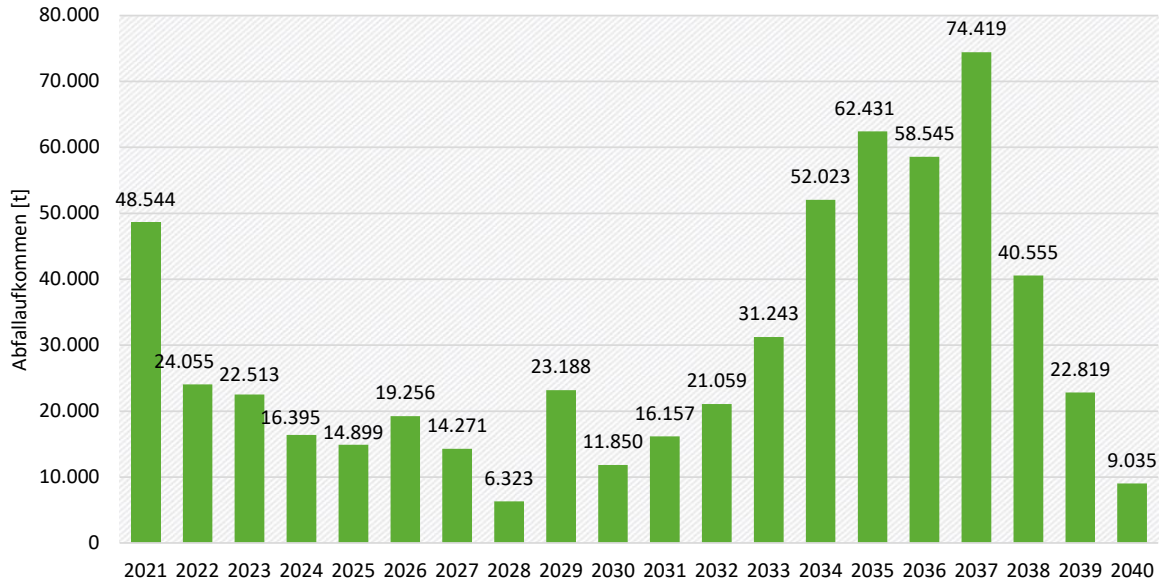
Der starke Anstieg der rückläufigen Verbundwerkstoffe in der GFK/CFK-Materialklasse ergibt sich aus der gewählten Methodik zur Schließung der Datenlücke. Bei der Abschätzung nach Leistungsklassen wird das gesamte Abfallaufkommen mittels materialspezifischen Allokationsparametern auf die einzelnen Abfallfraktionen aufgeteilt. Die Allokationsparameter für CFK sind im Vergleich zu den Parametern für GFK und auch verglichen mit den Anteilen der jeweiligen Fasern in dem Regressionsmodell deutlich geringer, was den starken Anstieg von GFK im Vergleich zu CFK erklärt. Der starke absolute Anstieg der rückläufigen Materialmenge ergibt sich daraus, dass durch die Berücksichtigung über die Leistungsklasse 2996 zusätzliche WEA und ihre Rotorblätter in die Materialklasse GFK/CFK aufgenommen werden, da diese nach 2001 errichtet wurden und in die Leistungsklassen C3 bis C5 (Sommer et al. 2020) fallen. Dadurch werden 90% mehr Anlagen und ihre Rotorblätter betrachtet, und da diese zusätzlich betrachteten WEA in hohe Leistungsklassen fallen, sind die materialspezifischen Allokationsparameter entsprechend hoch, sodass ein Anstieg der Gesamtmenge um 130 % nachvollziehbar ist.

2.4.2.3 Berechnung der Materialmengen von GFK und CFK

Im Folgenden werden die prognostizierten Abfallmengen für die Verbundwerkstoffe unabhängig von den Materialklassen GFK bzw. GFK/CFK dargestellt. Demnach werden die Summen der Mengen aus den Materialklassen übereinandergelegt, um das jeweilige absolute Aufkommen zu bestimmen. Dadurch verändert sich das dargestellte Bild.

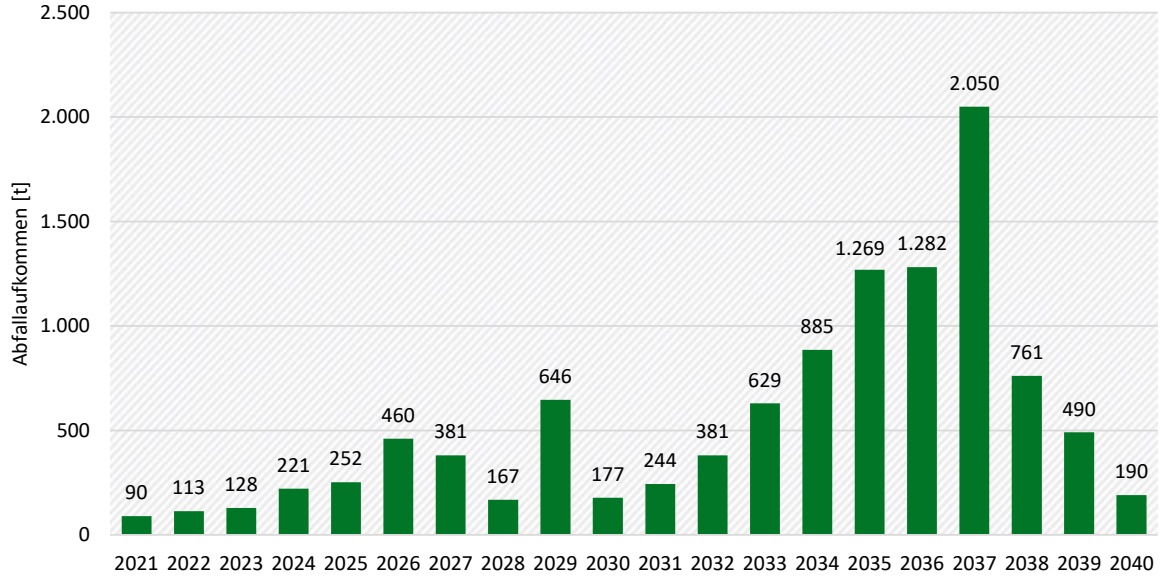
Abbildung 59 zeigt den zeitlichen Verlauf des Abfallaufkommens an GFK aus den beiden Materialklassen für die Jahre 2021 bis 2040. Dabei wird erneut angenommen, dass die Lebenserwartung eines Rotorblatts dem einer WEA entspricht und bei 20 Jahren liegt. Zusätzlich wurde angenommen, dass Rotorblätter und Anlagen, die derzeit in Betrieb und älter als 20 Jahre sind, im Jahr 2021 zurückgebaut werden und dass keine Anlagen in einen Second-Use-Markt gehen. Über diesen Zeitraum werden 589.581 t Abfälle an Verbundwerkstoffen mit GFK erwartet.

Abbildung 59: Abfallprognose für GFK-Verbundwerkstoffe; kumulierte Abfallmenge: 589.581 t (Rechnung 1, Material- und Leistungsklasse).



Quelle: Eigene Darstellung, KIT-IIP.

Abbildung 60: Abfallprognose für CFK-Verbundwerkstoffe; kumulierte Abfallmenge: 10.816 t (Rechnung 1, Material- und Leistungsklasse).



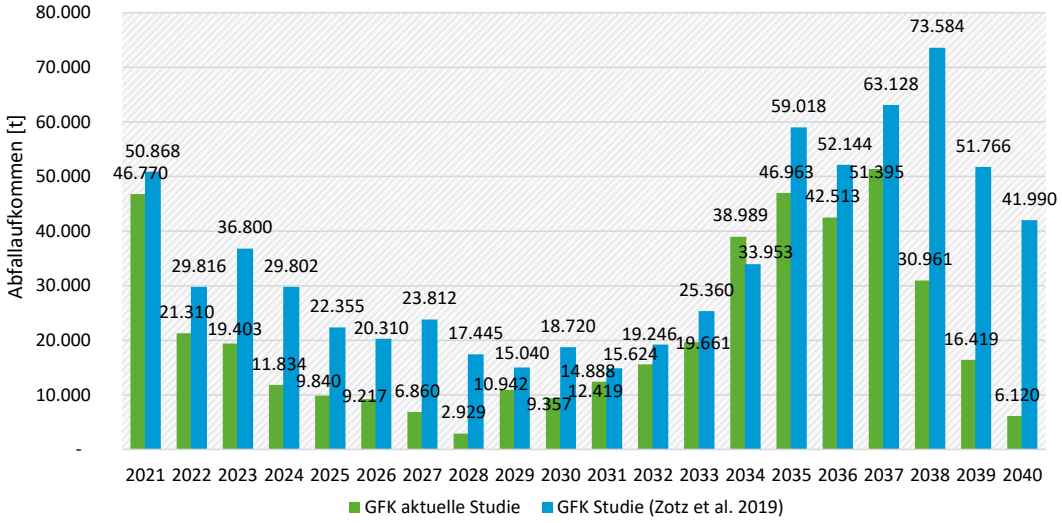
Quelle: Eigene Darstellung, KIT-IIP.

Abbildung 60 zeigt das Abfallaufkommen an CFK aus den beiden Materialklassen für die Jahre 2021 bis 2040. Über diesen Zeitraum fallen 10.816 t Abfälle an Verbundwerkstoffen mit CFK an. In der Berechnung werden sowohl die Anlagen und ihre Rotorblätter berücksichtigt, die klar einer Materialklasse zugeordnet werden können, als auch diejenigen, die aufgrund der Zuordnung zu einer Leistungsklasse CFK enthalten müssen. Das umfasst demnach 21 % aller WEA Anlagen und ihre Rotorblätter. Der CFK-Anteil in den Rotorblättern liegt in dieser Rechnung bei 7 %.

2.4.2.4 Gegenüberstellung zur Literatur

Zotz et al. (2019) betrachten Verbundwerkstoffe aus WEA in Deutschland und unterscheiden dabei zwischen Verbundwerkstoffen, die nur GFK enthalten und jenen, die sowohl GFK als auch CFK enthalten. Durch diese Betrachtung ist die Vergleichbarkeit mit den vorliegenden Abschätzungen nach den Materialklassen GFK und GFK/CFK gegeben.

Abbildung 61: Vergleich Abfallprognose aktuelle Studie und Vorgängerstudie von Zotz et al. 2019; kumulierte GFK-Abfallmenge: (Rechnung 1, GFK, Material- und Leistungsklassen).



Quelle: Eigene Darstellung, KIT-IIP.

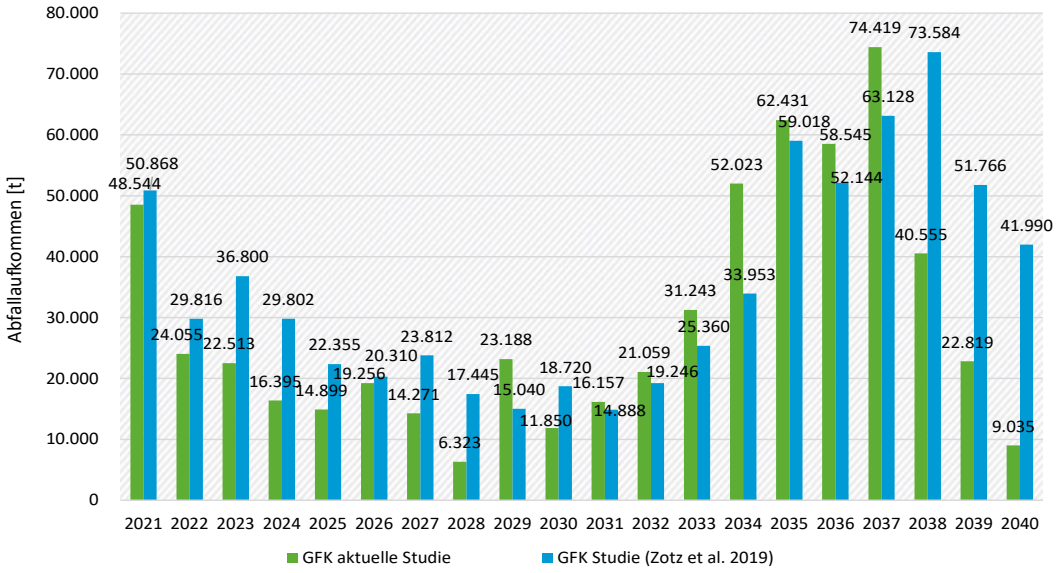
In der Gegenüberstellung in Abbildung 61 sieht man, dass das hier prognostizierte Abfallaufkommen von 429.525 t GFK-Abfällen aus der Materialklasse GFK bis zum Jahr 2040 deutlich geringer ausfällt als die 700.045 t in der Vorgängerstudie. Ein Grund könnte darin liegen, dass die Vorgängerstudie nicht nur GFK aus Rotorblättern, sondern auch aus dem Gehäuse der Gondel betrachtet. Dadurch fallen entsprechend höhere Materialmengen an. Zotz et al. (2019) nehmen zudem einen hohen Zubau für die Jahre 2018 bis 2020 an WEA an, der aber bis Ende 2020 aus verschiedenen Gründen so nicht eingetreten ist. Das kann insbesondere die deutlichen Unterschiede der prognostizierten Abfallmengen in den Jahren 2037 bis 2040 erklären. Die Vorgängerstudie scheint die in diesem Zeitraum anfallenden Mengen zu überschätzen.

In der Vorgängerstudie wird in der Materialklasse GFK/CFK nicht zwischen den Mengen an GFK und CFK differenziert, sondern nur die Gesamtmenge des Abfalls an Verbundwerkstoffen beziffert. Zotz et al. (2019) erwarten bis 2040 GFK-/CFK-Abfälle von 59.349 t. Dabei liegt der Anteil an WEA mit Rotorblättern, die CFK enthalten, bei 23%, und es wird in ihrer Studie ein CFK-Anteil von 10 bis 20% pro Rotorblatt angenommen.

Im Folgenden wird diese Gesamtmenge mit der hier ermittelten Gesamtmenge verglichen. Beim Materialrücklauf der GFK/CFK-Materialklasse wird, abhängig von den zugrunde gelegten Daten, ein erheblicher Unterschied gegenüber der Vorgängerstudie deutlich Stützt man sich auf die Prognose mit Daten, die klar der GFK/CFK-Materialklasse zugeordnet werden konnten, dann liegt man mit 76.927 t Verbundwerkstoffen in einer ähnlichen Größenordnung wie die Vorgängerstudie. Dabei teilen sich die prognostizierten 76.927 t Verbundwerkstoffe in 7.188 t CFK-Abfälle und 69.739 t GFK-Abfälle auf. In der vorliegenden Studie haben damit 11 % der WEA Rotorblätter mit CFK. Der CFK-Anteil in den Rotorblättern liegt bei 7 %.

Abbildung 62 zeigt den Vergleich der Prognosen für die kumulierte Gesamtmenge GFK aus GKF und GFK/CFK aus dieser Studie mit den Ergebnissen der Studie von Zotz et al. (2019). Die kumulierte GFK-Gesamtmenge aus der Abschätzung der Material- und Leistungsklassen für GFK und GFK/CFK beträgt 589.581 t. Damit liegt die rückläufige Menge an GFK über die nächsten 20 Jahre ca. 110.000 t unter dem Wert der Vorgängerstudie. Die verbleibenden 10.816 t entfallen auf CFK-Abfälle. Dabei enthalten 21 % der WEA Rotorblätter CFK.

Abbildung 62: Vergleich Abfallprognosen aktuelle Studie und Vorgängerstudie von Zotz et al. 2019; kumulierte GFK Abfallmenge: (Rechnung 1, GFK aus GFK und GFK/CFK, Material- und Leistungsklassen).



Quelle: Eigene Darstellung, KIT-IIP.

Den größten Einfluss auf diesen erheblichen Unterschied hat das verbaute GFK. Dadurch, dass GFK schwerer ist als CFK und in der hier vorliegenden Abschätzung ein geringerer CFK-Anteil in den Rotorblättern als in Zotz et al. (2019) angenommen wird, erhöht sich auch entsprechend die gesamte Rücklaufmenge. Allgemein werden zwei Unsicherheiten in der Berechnung deutlich:

1) der Anteil an WEA und ihrer Rotorblätter mit CFK-Teilen
2) der Massenanteil der verbauten CFK-Teile je Rotorblatt.

Die folgenden beiden Rechnungen sollen diesen Unsicherheiten gerecht werden und die mögliche Bandbreite der Ergebnisse aufzeigen, die sich durch diese beiden Faktoren ergeben.

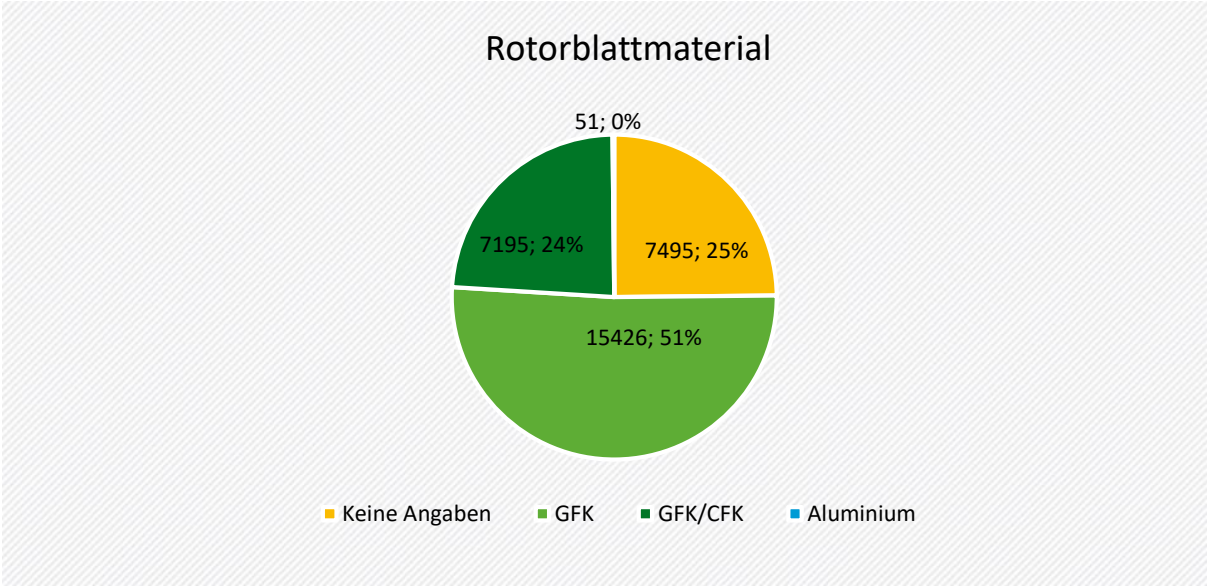
2.4.3 Abschätzung des Abfallaufkommens nach Option C (Rechnung 2: Eigenes Regressionsmodell auf erweiterter Datenbasis)

Rechnung 2 begegnet der Unsicherheit bzgl. der Anzahl an WEA, in denen CFK verbaut ist. Durch erweiterte Recherchen und zusätzliche Annahmen wurde die Datenlücke für Rotorblätter, die keine Angabe bzgl. des Rotorblattmaterials haben, verringert. Dadurch kann ein größerer Teil des rückläufigen Materials aus den Rotorblättern über die Regressionsmodelle berechnet werden und der Ansatz einer Abschätzung über die Leistungsklassen fällt weniger stark ins Gewicht. Zusätzlich wurde nicht die Regressionfunktion von Sommer et al. (2020) genutzt, sondern eine eigene Regressionfunktion erstellt, basieren auf den in Deutschland installierten Anlagen.

2.4.3.1 Datengrundlage

Der Anteil an Rotorblättern, in denen eindeutig CFK verbaut ist (11 %), ist im Vergleich zur Vorgängerstudie (23 %) unterrepräsentiert. Aus diesem Grund wurden die Anlagen, für die keine Informationen hinsichtlich des verbauten Hauptmaterials vorlagen, aber deren Rotorblattlänge bekannt ist, der Materialklasse GFK/CFK zugeordnet. In diesen modifizierten Datensatz fallen 24 % der WEA und ihre Rotorblätter in die Materialklasse GFK/CFK. Dieser liegt damit auf dem Niveau der Vorgängerstudie von Zotz et al. (2019). Abbildung 63 zeigt die neue Verteilung des Hauptmaterials der Rotorblätter. Dabei entfallen 15.426 Anlagen und ihre Rotorblätter auf die Materialklasse GFK. 7.195 WEA und ihre Rotorblätter werden der Materialklasse GFK/CFK zugeordnet. Die verbleibenden Einträge (25 %) ohne Angabe werden erneut über eine Abschätzung aufgrund der Leistungsklasse berücksichtigt.

Abbildung 63: Anteile der Rotorblattmaterialien an den MaStR-Daten und der Hauptmaterialien der Rotorblätter (Rechnung 2).



Quelle: Eigene Darstellung, KIT-IIP.

Aufbauend auf den recherchierten und modifizierten Daten wurde eine eigene Regressionsfunktion nach der Methodik von Sommer et al. (2020) abgeleitet. Dies erlaubt eine genauere Betrachtung der WEA und Rotorblätter des deutschen Raums. Das Rotorblattgewicht von Rotorblättern in Tonnen, deren Hauptmaterial GFK ist, berechnet sich nach folgender Formel:

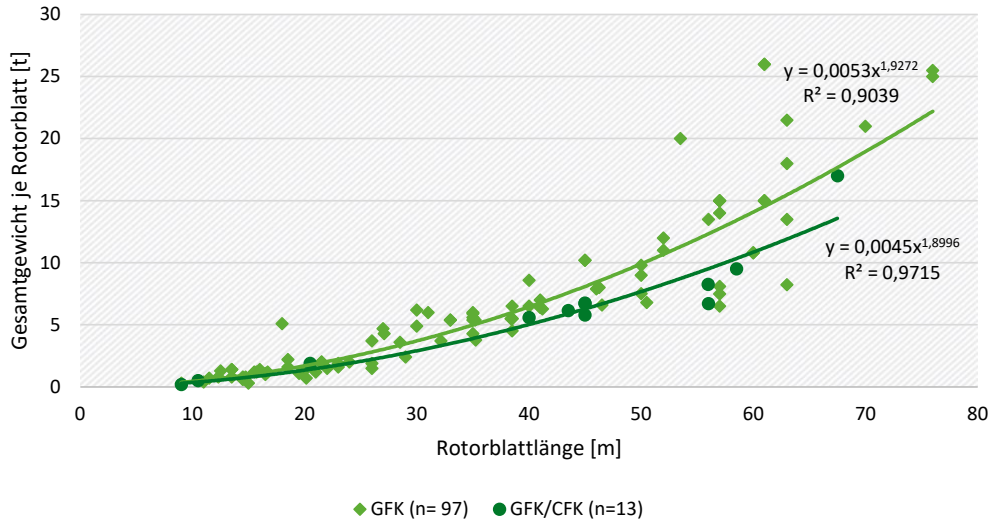
$$\text{Rotorblattgewicht}_{GFK}\,[t] = 0{,}0053 * \text{Rotorblattlänge}\,[m]^{1{,}9272}$$

Das Gewicht der Rotorblätter in Tonnen aus der Materialgruppe GFK/CFK berechnet sich mit der nachstehenden Formel:

$$\text{Rotorblattgewicht}_{GFK/CFK}\ [t] = 0{,}0045 * \text{Rotorblattlänge}\ [m]^{1{,}8996}$$

Die abgeleiteten Funktionen sind in Abbildung 64 und Abbildung 65 dargestellt.

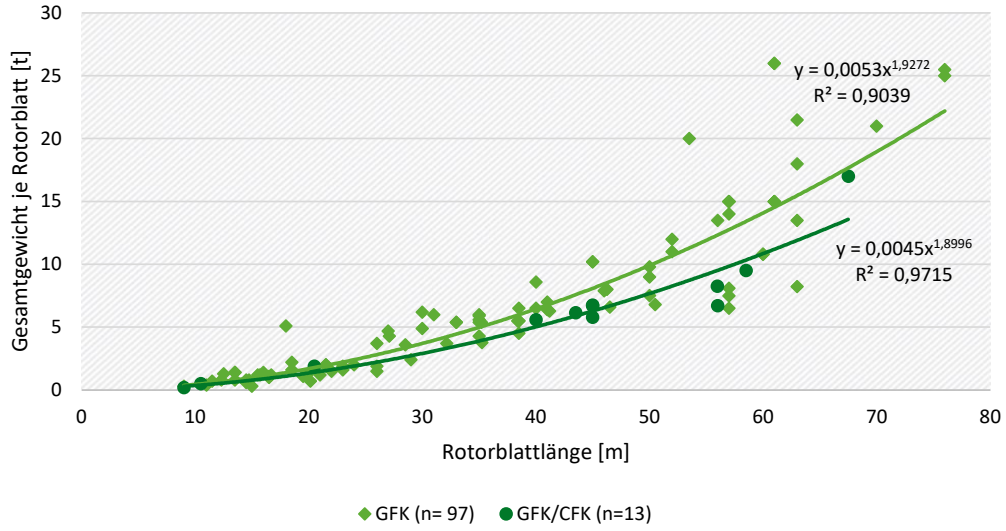
Abbildung 64: Berechnetes Gesamtgewicht je Rotorblatt in Abhängigkeit der Rotorblattlänge nach Formel (1).



Quelle: Eigene Darstellung, KIT-IIP.

Das Bestimmtheitsmaß R^2 zeigt dabei die Güte der Regressionsfunktion an, d. h. wie gut die Regressionsfunktion einen vorliegenden Datensatz abbildet. Werte nahe 1 lassen auf eine hohe Güte schließen.

Abbildung 65: Berechnetes Gesamtgewicht je Rotorblatt in Abhängigkeit der Rotorblattlänge nach Formel (2).

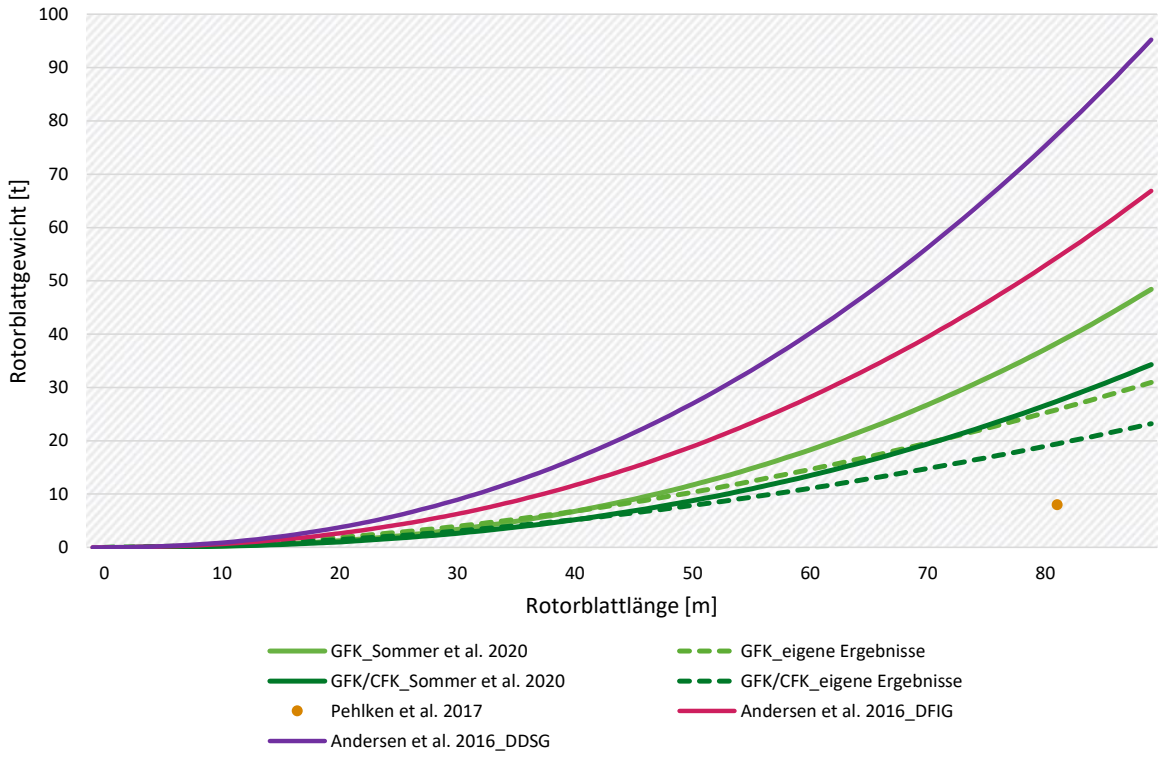


Quelle: Eigene Darstellung, KIT-IIP.

Vergleicht man die Regressionsfunktionen aus Sommer et al. (2020) und Andersen et al. (2016) mit denen aus der vorliegenden Studie (siehe Abbildung 66), dann wird deutlich, dass sich diese

erst bei langen Rotorblattlängen über 50 m stärker unterscheiden. Offensichtlich ist, dass Pehlken et al. (2017) mit ihrer Abschätzung deutlich unter den abgeleiteten Regressionsfunktionen liegen. Andersen et al. (2016) liegen in seiner Abschätzung für Abfälle aus Rotorblättern in Schweden mit seinen verwendeten Regressionsfunktionen weit über denen von Sommer et al. (2020). Andersen et al. (2016) geben allerdings nur den Zusammenhang von Rotordurchmesser anstelle der Rotorblattlänge zum Gewicht der faserverstärkten Kunststoffe an. Um die Werte vergleichbar zu machen wurde der Durchmesser halbiert, was aufgrund der Nabe zu Inkonsistenzen hinsichtlich der Rotorblattlängen führen kann. Zudem unterscheiden Andersen et al. (2016) zwischen der Getriebeart der WEA bei der Quantifizierung des zu erwartenden Rotorblattaufkommens in Synchrongeneratoren mit Direktantrieb (direct drive synchronous generator, DDSG) sowie doppelt gespeiste Induktionsgeneratoren (doubly-fed induction generator, DFIG). Es ist zu sehen, dass Generatoren mit Direktantrieb deutlich schwerere Rotorblätter haben. Im MaStR liegen keine Daten darüber vor, welche Getriebe die WEA haben. Daher lässt sich der Ansatz von Andersen et al. (2016) aktuell nicht auf Deutschland übertragen. Die Getriebearten könnten manuell nachrecherchiert werden. Allerdings unterscheiden Andersen et al. (2016) nicht in die unterschiedlichen Materialklassen (GFK und GFK/CFK) in Rotorblättern. Diese Unterscheidung ist jedoch wesentlich für die Quantifizierung der einzelnen Materialien im Hinblick auf ihr Recycling bzw. ihre Verwertung.

Abbildung 66: Vergleich der betrachteten Regressionsfunktionen des Rotorblattgewichts in Abhängigkeit der Rotorblattlänge in dieser Studie mit Werten aus der Literatur ((Sommer et al. 2020); (Pehlken et al. 2017); (Andersen et al. 2016) basierend auf (Caduff et al. 2012).



Quelle: Eigene Darstellung, KIT-IIP.

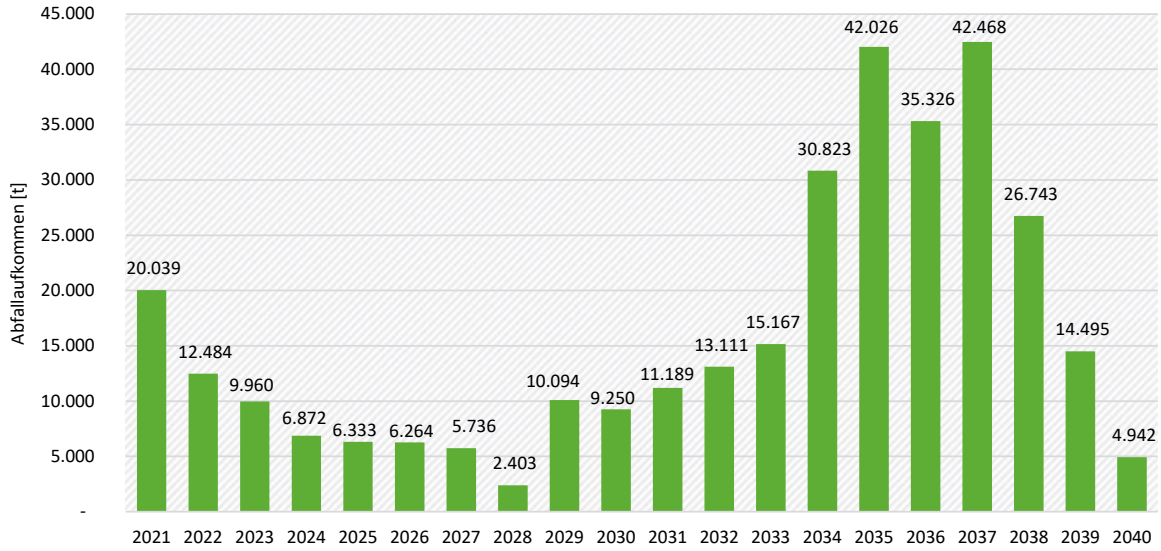
2.4.3.2 Berechnung der Materialmengen nach den Materialklassen GFK und GFK/CFK

Im Folgenden werden die prognostizierten Abfallmengen für die jeweilige Materialklasse GFK bzw. GFK/CFK in Rechnung 2 dargestellt. Erneut werden zunächst nur die Rotorblätter

betrachtet, die klar einer dieser Klassen zugeordnet werden konnten. In einem zweiten Schritt werden auch die Rotorblätter aufgenommen, die durch das Schließen der Datenlücke über die Leistungsklassen in eine der beiden Materialklassen fallen.

Betrachtet man nur die Rotorblätter, die eindeutig der Materialklasse GFK zugeordnet werden konnten, dann fallen über die nächsten 20 Jahre 325.726 t Verbundwerkstoffe mit GFK an. Im Vergleich zu Rechnung 1 nimmt die Menge also ab. Das liegt u. a. an den Rotorblättern von Vestas, die nun alle der Materialklasse GFK/CFK zugeordnet werden und durch das geringere CFK-Gewicht zu einer geringeren Abfallmenge führen. Abbildung 67 zeigt den zeitlichen Verlauf des Abfallaufkommens an GFK in den Jahren von 2021 bis 2040. Die Mengen wurden mittels des neu entwickelten Regressionsmodells bestimmt. Dabei wurde angenommen, dass die Lebenserwartung eines Rotorblatts dem einer WEA entspricht und bei 20 Jahren liegt. Zusätzlich wurde angenommen, dass Rotorblätter und Anlagen, die derzeit in Betrieb und älter als 20 Jahre sind, im Jahr 2021 zurückgebaut werden und dass keine Anlagen in den Second-Use-Markt gehen.

Abbildung 67: Abfallprognose der Verbundwerkstoffe aus der GFK Materialklasse; kumulierte Abfallmenge: 325.726 t (Rechnung 2, Materialklasse).



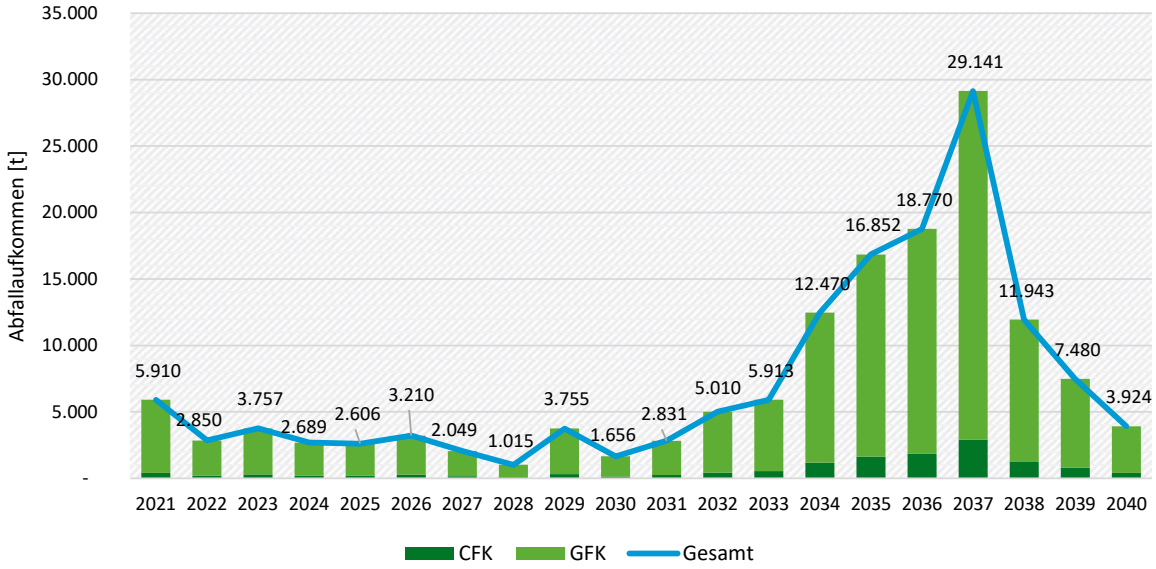
Quelle: Eigene Darstellung, KIT-IIP.

Betrachtet man die Rotorblätter, die nach den Modifizierungen eindeutig der Materialklasse GFK/CFK zugeordnet werden konnten, dann fallen über die nächsten 20 Jahre 143.832 t Verbundwerkstoffe mit GFK und CFK an. Der Wert ist demnach fast doppelt so hoch wie der Wert aus Rechnung 1. Das liegt daran, dass sich die Anzahl an Rotorblättern in der Materialklasse ebenfalls beinahe verdoppelt hat. Die Nutzung der materialspezifischen Allokationsparameter von Sommer et al. (2020) erlaubt die Unterscheidung der Gesamtabfallmenge in die Teilabfallmengen je einzelner Fasertypen (GFK und CFK). Demnach beinhaltet die Gesamtmenge 13.620 t Verbundwerkstoffe mit CFK und 130.211 t Verbundwerkstoffe mit GFK. Auch in dieser Rechnung wurde angenommen, dass die Lebenserwartung eines Rotorblatts bei 20 Jahren liegt, dass Rotorblätter, die derzeit in Betrieb und älter als 20 Jahre sind, im Jahr 2021 zurückgebaut werden und dass keine Rotorblätter in den Second-Use-Markt gehen. Abbildung 68 zeigt den zeitlichen Verlauf des Abfallaufkommens aus der Materialklasse GFK/CFK für die Jahre 2021 bis 2040. Es ist hervorzuheben, dass der CFK-Anteil in den Rotorblättern nach wie vor bei 7 % des Gesamtgewichts der Rotorblätter liegt.

Erweitert man die Datengrundlage um die Rotorblätter, deren Hauptmaterial im Datensatz nicht identifiziert werden konnte, sondern bei denen stattdessen deren Leistungsklasse betrachtet wurde, dann erhöhen sich die prognostizierten Abfallmengen in den jeweiligen Materialklassen (vgl. Abbildung 69). Das genaue Vorgehen ist analog zu Rechnung 1.

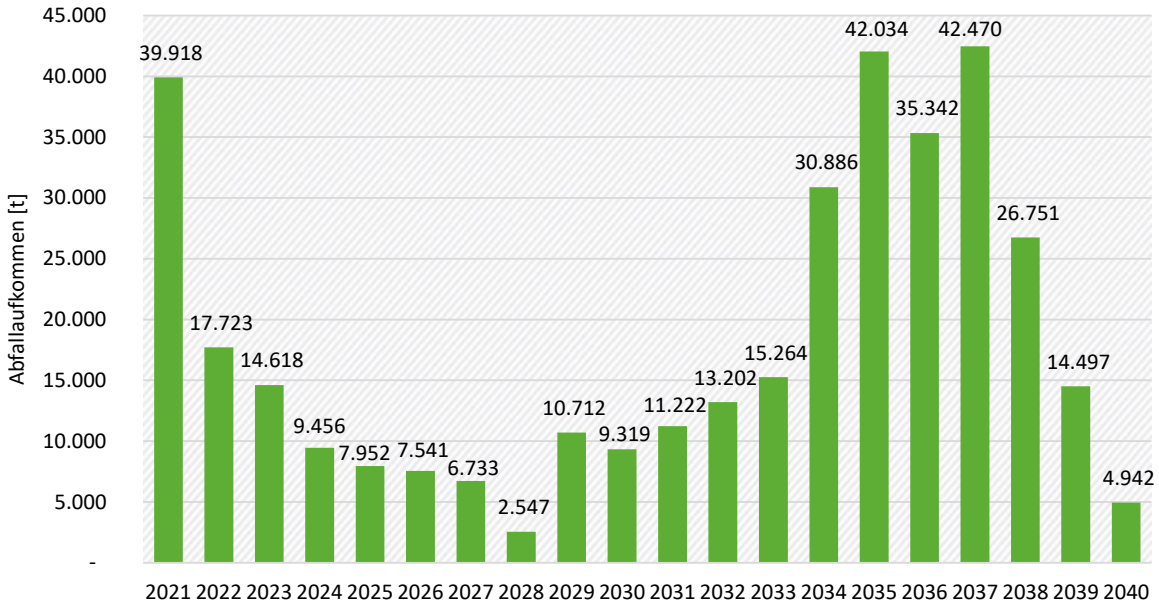
Unter Einbeziehung der Materialabschätzung nach Leistungsklassen erhöht sich die rückläufige Menge an GFK-Verbundwerkstoffen aus der Materialklasse GFK um 37.400 t auf eine Gesamtmenge von 363.127 t. Das entspricht dem gleichen Anstieg wie in Rechnung 1. Abbildung 69 zeigt den zeitlichen Verlauf des Abfallaufkommens aus der Materialklasse im Zeitverlauf über die Jahre von 2021 bis 2040. In die Abschätzung wurden nur Mengen aus Rotorblättern aufgenommen, die nach der Zuordnung zu einer Leistungsklasse und auch entsprechend ihres Alters, kein CFK enthalten.

Abbildung 68: Abfallprognose der Verbundwerkstoffe aus der GFK/CFK Materialklasse; kumulierte Abfallmenge: 143.832 t (Rechnung 2, Materialklasse).



Quelle: Eigene Darstellung, KIT-IIP.

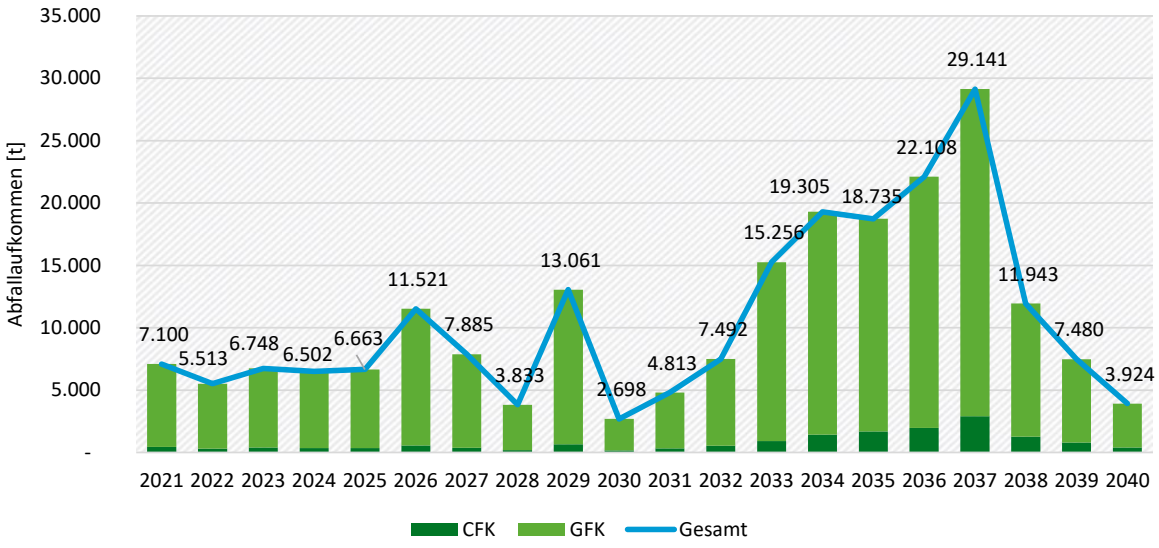
Abbildung 69: Abfallprognose der Verbundwerkstoffe aus der GFK Materialklasse; kumulierte Abfallmenge: 363.127 t (Rechnung 2, Material- und Leistungsklasse).



Quelle: Eigene Darstellung, KIT-IIP.

Unter Einbeziehung der Materialabschätzung nach Leistungsklassen, erhöht sich die prognostizierte rückläufige Menge an GFK/CFK-Verbundwerkstoffen um 67.889 t auf eine Gesamtmenge von 211.721 t. Die Gesamtmenge beinhaltet 16.190 t Verbundwerkstoffe mit CFK und 195.531 t Verbundwerkstoffe mit GFK. Der Anstieg fällt gegenüber Rechnung 1 demnach deutlich geringer aus. Abbildung 70 zeigt den zeitlichen Verlauf des erwarteten Abfallaufkommens aus der Materialklasse GFK/CFK für die Jahre 2021 bis 2040. In die Abschätzung wurden nur Mengen aus Rotorblättern aufgenommen, die nach der Zuordnung zu einer Leistungsklasse und auch entsprechend ihres Alters CFK enthalten können. Dadurch steigt der Anteil an WEA mit Rotorblättern mit verbautem CFK auf 32 %.

Abbildung 70: Abfallprognose der Verbundwerkstoffe aus der GFK/CFK Materialklasse; kumulierte Abfallmenge: 211.721 t (Rechnung 2, Material- und Leistungsklasse).



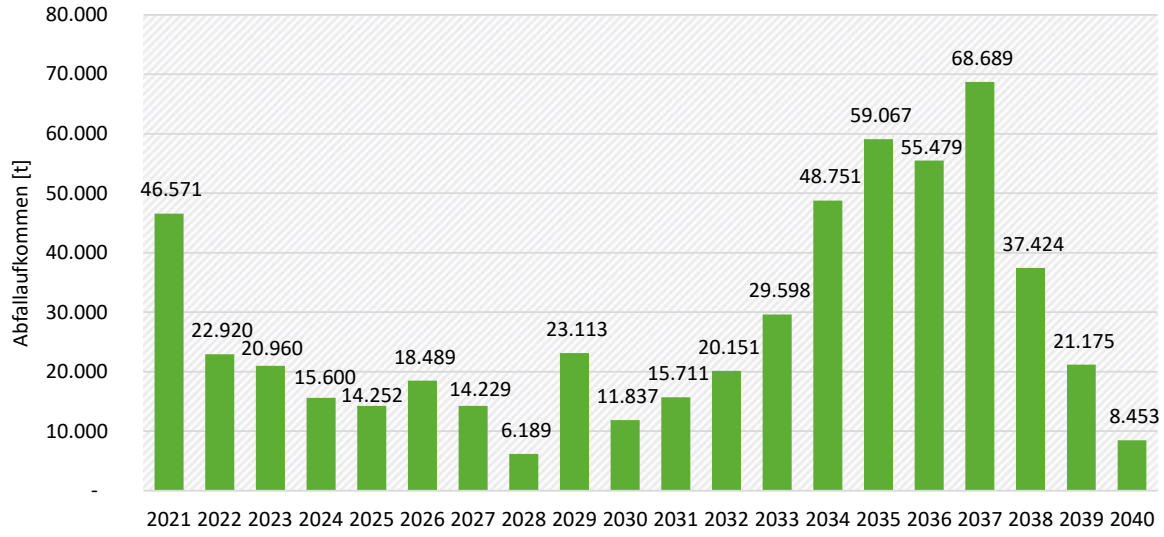
Quelle: Eigene Darstellung, KIT-IIP.

Der erneute starke Anstieg der Materialmengen lässt sich mit den 2.425 WEA und ihren Rotorblättern erklären, die über die Leistungsklassen der Materialklasse GFK/CFK zugeordnet werden. Der Anstieg von 33 % im Anlagenbestand der Materialklasse entspricht in etwa dem Anstieg des rückläufigen Materials. Auch hier fällt der materialspezifische Allokationsparameter für GFK im Vergleich zu den Werten von Sommer et al. (2020) höher aus, weswegen das rückläufige GFK stärker zunimmt als das rückläufige CFK.

2.4.3.3 Berechnung der Materialmengen von GFK und CFK

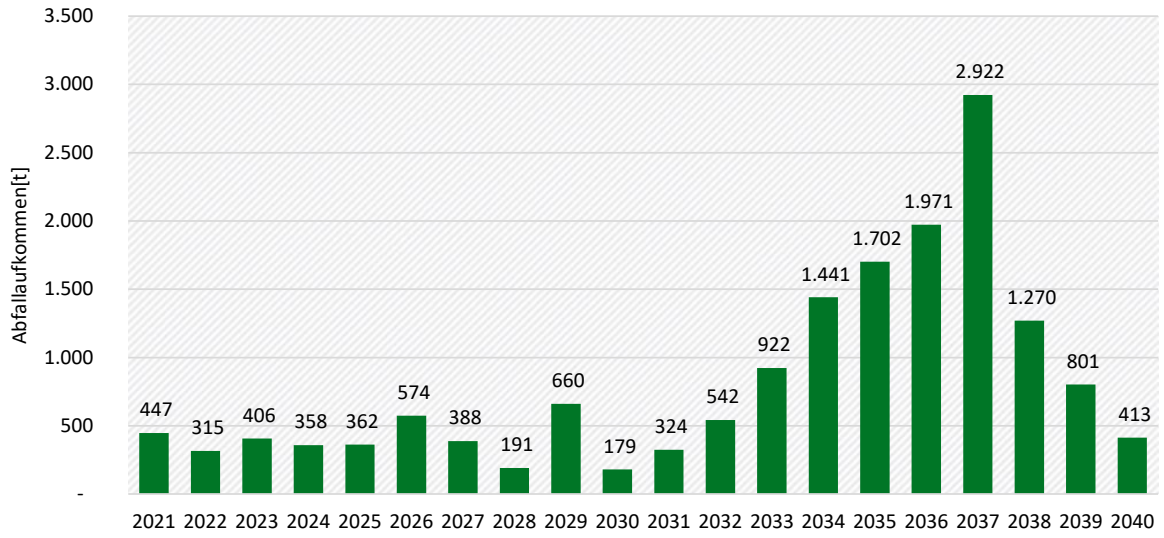
Betrachtet man erneut die prognostizierten Abfallmengen für die Verbundwerkstoffe unabhängig von den Materialklassen GFK bzw. GFK/CFK, dann verändert sich auch hier das dargestellte Bild. Abbildung 71 zeigt das Abfallaufkommen an GFK aus den beiden Materialklassen GFK und GFK/CFK für die Jahre 2021 bis 2040. Dabei wird erneut angenommen, dass die Lebenserwartung eines Rotorblatts dem einer WEA entspricht und bei 20 Jahren liegt. Zusätzlich wurde angenommen, dass Rotorblätter und Anlagen, die derzeit in Betrieb und älter als 20 Jahre sind, im Jahr 2021 zurückgebaut werden und dass keine Rotorblätter in den Second-Use-Markt gehen. Über diesen Zeitraum fallen 558.657 t Abfälle an Verbundwerkstoffen mit GFK an.

Abbildung 71: Abfallprognose für GFK-Verbundwerkstoffe; kumulierte Abfallmenge: 558.657 t (Rechnung 2, Material- und Leistungsklasse).



Quelle: Eigene Darstellung, KIT-IIP.

Abbildung 72: Abfallprognose für CFK-Verbundwerkstoffe; kumulierte Abfallmenge: 16.190 t (Rechnung 2, Material- und Leistungsklasse).



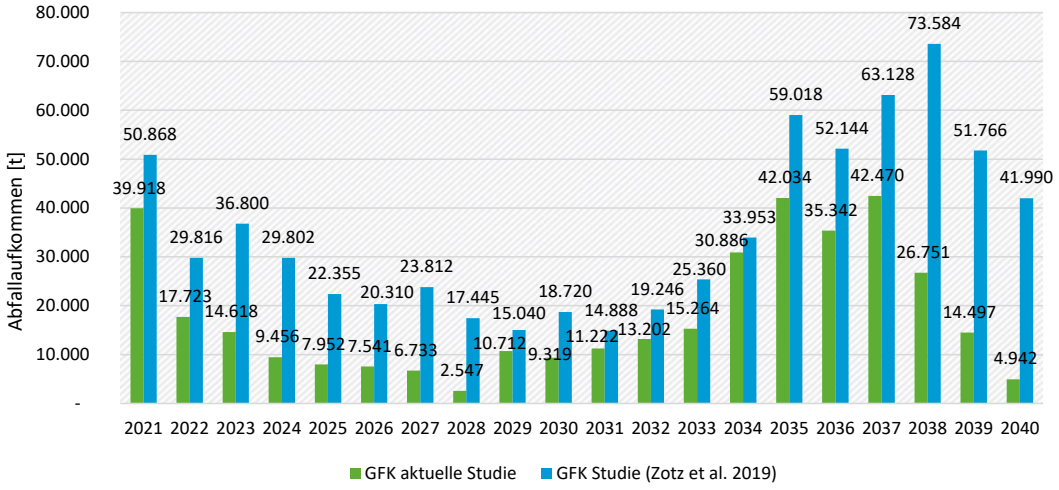
Quelle: Eigene Darstellung, KIT-IIP.

Abbildung 72 zeigt das Abfallaufkommen an CFK für die Jahre 2021 bis 2040. Über diesen Zeitraum fallen 16.190 t Abfälle an Verbundwerkstoffen mit CFK an. In der Berechnung werden sowohl die Anlagen und ihre Rotorblätter berücksichtigt, die klar einer Materialklasse zugeordnet werden können, als auch diejenigen, die aufgrund der Zuordnung zu einer Leistungsklasse CFK enthalten müssen. Das umfasst demnach 32 % aller WEA und ihre Rotorblätter.

2.4.3.4 Gegenüberstellung zur Literatur

Die Ergebnisse werden im Folgenden mit den Ergebnissen der Vorgängerstudie von Zotz et al. (2019) verglichen. In der Gegenüberstellung (Abbildung 78) sieht man, dass das prognostizierte Abfallaufkommen von 363.127 t GFK-Abfällen aus der Materialklasse GFK bis zum Jahr 2040 geringer ausfällt als die 700.045 t der Vorgängerstudie.

Abbildung 73: Vergleich der Abfallprognosen aktuelle Studie und Vorgängerstudie von Zotz et al. (2019); kumulierte GFK-Abfallmenge: (Rechnung 2, GFK, Material- und Leistungsklassen).



Quelle: Eigene Darstellung, KIT-IIP.

Auch hier sind als möglicher Grund die Einhausungen der Gondeln, die in der Vorgängerstudie berücksichtigt wurden, zu nennen. Gleiches gilt für den dort angenommenen hohen WEA-Zubau in Deutschland in den Jahren 2018-2020, der aber bis Ende 2020 so nicht stattgefunden hat. Das kann insbesondere die Unterschiede in den prognostizierten Abfallmengen in den Jahren 2037 bis 2040 erklären. Die Vorgängerstudie scheint die in diesem Zeitraum anfallenden Mengen zu überschätzen. Zotz et al. (2019) schätzen die Gesamtmenge des Abfalls an Verbundwerkstoffen aus der Materialklasse CFK/GFK auf 59.349 t bis zum Jahr 2040. Dabei liegt der Anteil an WEA mit Rotorblättern, die CFK enthalten bei 23 %. Es wird ein CFK-Anteil von 10 bis 20 % pro Rotorblatt angenommen.

Auch in Rechnung 2 wird bei dem Materialrücklauf der GFK/CFK Materialklasse ein erheblicher Unterschied gegenüber der Vorgängerstudie deutlich. Stützt man sich auf die Prognose mit Daten von WEA, die klar der GFK/CFK-Materialklasse zugeordnet werden konnten, dann liegt man mit 143.832 t Verbundwerkstoffen bei deutlich höheren Abfallmengen als die Vorgängerstudie. Dabei werden CFK-Abfälle von 13.620 t und GFK-Abfälle von 130.211 t prognostiziert. Es tragen 24 % der WEA-Rotorblätter mit CFK dazu bei. Der CFK-Anteil in den Rotorblättern liegt bei 7 %. Es ist auffällig, dass trotz der gleichen Größenordnung an Rotorblättern mit verbauten CFK-Anteilen, die Abfallmenge deutlich höher ausfällt. Das kann erneut an dem geringeren angenommenen CFK-Anteil in den Rotorblättern liegen sowie dem höheren Gewicht von GFK im Vergleich zu CFK.

Betrachtet man die Prognose, die die Abschätzung über die Leistungsklassen beinhaltet, dann liegt die zu erwartende Rücklaufmenge an Verbundwerkstoffen über die nächsten 20 Jahre ca. 150.000 t über dem Wert der Vorgängerstudie. Das liegt insbesondere an den prognostizierten 195.531 t GFK-Materialien. Die verbleibenden 16.190 t entfallen auf CFK-Abfälle. 32 % der WEA Rotorblätter mit CFK tragen dazu bei.

Die Modifikation des Datensatzes führt dazu, dass sich der Rücklauf an Material aus der GFK/CFK-Materialklasse deutlich erhöht. Der Vergleich mit der Vorgängerstudie ist schwierig, da Zotz et al. (2019) nicht explizit zwischen den Materialien GFK und CFK unterscheiden. Die Gesamtmenge liegt deutlich über den geschätzten Mengen; betrachtet man CFK aber losgelöst, dann unterschreitet man die Abschätzung deutlich.

Die durchgeführte Rechnung 2 begegnet der Unsicherheit bzgl. des Anteils an WEA mit Rotorblättern, die verbaute CFK-Teile enthalten. Mit 24 % bzw. 32 % der WEA bzw. Rotorblättern mit CFK-Bauteilen ordnen sich die Zahlen in die bestehende Literatur ein (s. Tabelle 16).

Tabelle 16: Gegenüberstellung von Literaturwerten zum Anteil von WEA mit CFK-Bauteilen in den Rotorblättern und dem CFK-Anteil im Rotorblatt.

Studie	Anteile WEA mit CFK	Anteil CFK je Rotorblatt
Albers et al. (2009)	-	2,5%
Sommer et al. (2020)	29% (Windparks) 36% (WEA)	2,3–5,1%
Zotz et al. (2019)	23%	10–20%
Lefeuvre et al. (2019)	66% (weltweit; vereinfachende Annahmen)	6%

Quelle: Eigene Zusammenstellung, KIT-IIP.

2.4.4 Abschätzung des Abfallaufkommens nach Option C (Rechnung 3: Erhöhung des CFK-Anteils in GFK/CFK Rotorblättern)

Die folgende Rechnung 3 nimmt sich der zweiten Unsicherheit, dem Massenanteil der verbauten CFK-Bauteile, an. Auch dieser schwankt in der Literatur (siehe Tabelle 16). In den bisherigen Berechnungen lag der CFK-Anteil mit 7 % auf einem mittleren Niveau vergleichbar mit Lefeuvre et al. (2019). Rechnung 3 soll nun die Bandbreite der zu erwartenden Abfallmengen durch eine Erhöhung und eine Reduzierung des CFK-Anteils der Rotorblätter darstellen. Daher wurden drei Szenarien mit einem niedrigen, mittleren und hohen CFK-Anteil pro Rotorblatt unter Verwendung der angepassten Regressionsfunktionen für Deutschland berechnet (Abbildung 74). Durch diese Szenarien wird eine Abschätzung des möglichen Fehlers bei der CFK-Abfallmenge deutlich.

Für das Szenario *niedriger CFK-Anteil* pro Rotorblatt wurde ein Faktor von 8,5 (Maximalwert) zur Gewichtsreduzierung durch Verwendung von CFK genutzt (vgl. Sommer et al. (2020); Jamieson (2018)). Bei der Ermittlung der Materialmassen pro Leistungsklasse wurde die Untergrenze des CFK-Materialintervalls verwendet. Dies führt zu einem durchschnittlichen CFK-Gehalt von 5 % innerhalb eines CFK-haltigen Rotorblatts. Das Szenario *mittlerer CFK-Anteil* entspricht der Rechnung 2. Daher wird es nicht detaillierter beschrieben. Für das Szenario *hoher CFK-Anteil* wurde der Faktor der Gewichtsreduzierung auf den Mindestwert festgelegt und die Obergrenze der Materialintervalle innerhalb der Leistungsklassen verwendet. Dies ergibt einen durchschnittlichen CFK-Anteil von 17,22 % innerhalb eines CFK-haltigen Rotorblatts. Die Ergebnisse werden nur für die Materialklasse GFK/CFK dargestellt, da sich die Ergebnisse der Materialklasse GFK gegenüber Rechnung 2 nicht verändern.

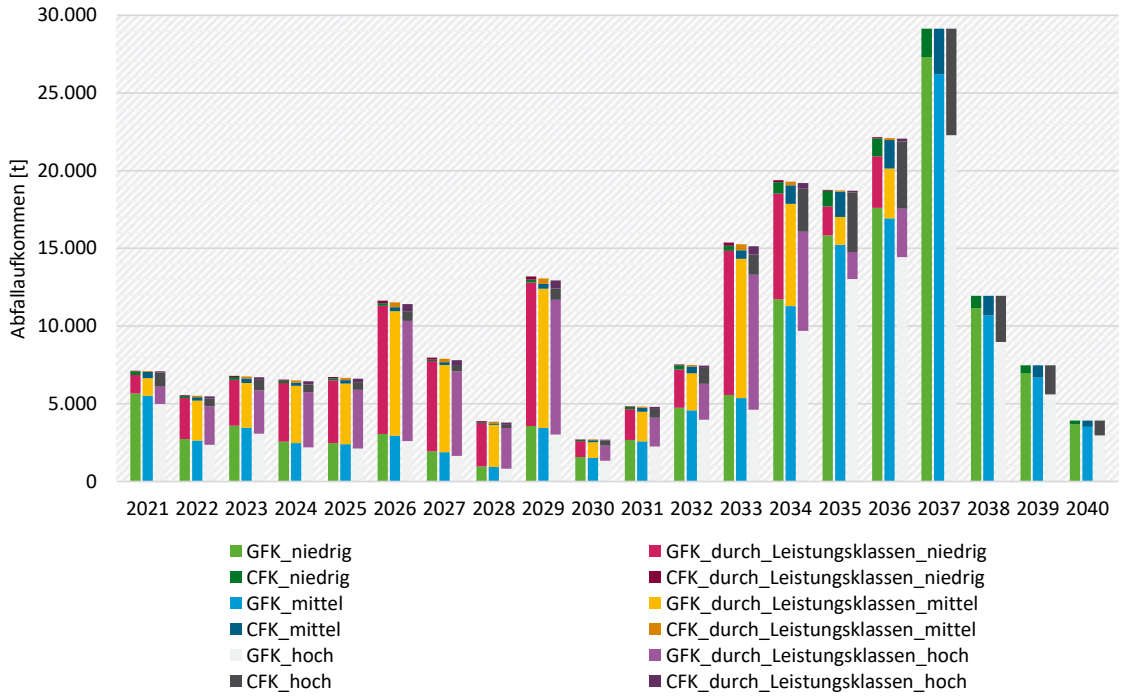
2.4.4.1 Datengrundlage

Für Rechnung 3 wird die gleiche Datengrundlage wie für Rechnung 2 zugrunde gelegt. Die WEA, für die keine Informationen hinsichtlich des verbauten Hauptmaterials vorlagen, aber deren Rotorblattlänge bekannt ist, werden der Materialklasse GFK/CFK zugeordnet. Der bisherige Materialanteil von CFK in den verbauten Rotorblättern wurde durch das Anpassen des Faktors zur Gewichtsreduzierung durch Verwendung von CFK variiert. Die CFK-Anteile von 5 % und 17,22 % sind näher an den Endpunkten der Bandbreiten, die in der Literatur für den CFK-Anteil am Rotorblattgewicht genannt werden.

2.4.4.2 Berechnung der Materialmengen in den Materialklassen GFK/CFK

Im Szenario mit *niedrigem CFK-Anteil* werden bis 2040 insgesamt 9.872 t CFK-Abfall erzeugt. Die Menge ist 39 % niedriger als in Rechnung 2 (16.190 t). Das Szenario mit *hohem CFK-Anteil* führt bis 2040 zu insgesamt 35.657 t CFK-Abfall. Im Vergleich zur Rechnung 2 bedeutet dies eine Steigerung von 120 %. Bei einer Gesamtabfallmenge der Materialklasse CFK/GFK von 211.721 t nimmt die Menge an GFK entsprechend zu beziehungsweise ab. Man sieht, dass der Parameter CFK-Anteil je Rotorblatt einen großen Einfluss auf die geschätzten Abfallmengen an Rotorblättern hat.

Abbildung 74: Abfallprognose der Verbundwerkstoffe aus der GFK/CFK Materialklasse für Szenarien mit niedrigem, mittlerem und hohem CFK-Anteil in Rotorblättern (Rechnung 3, Material- und Leistungsklasse).



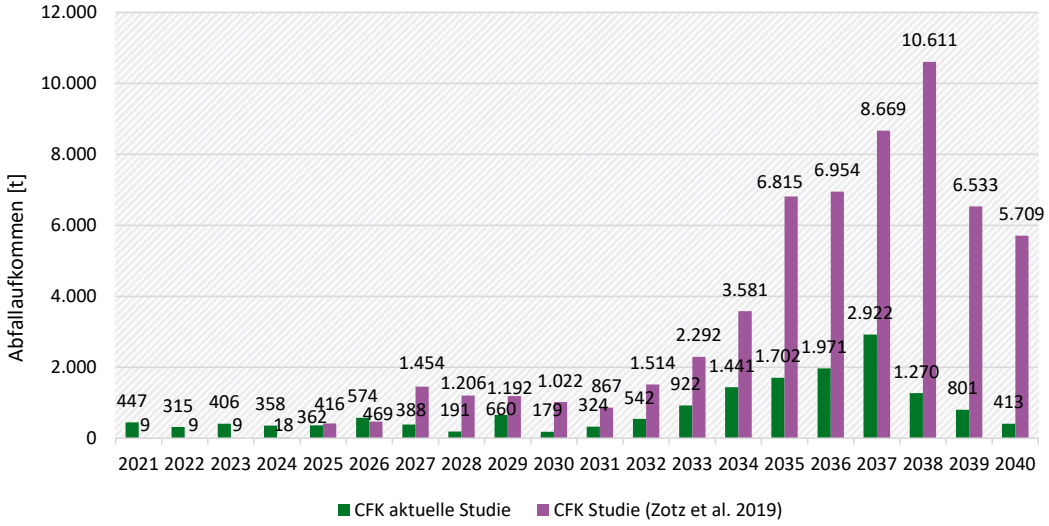
Anmerkung: der erste gestapelte Balken je Jahreszahl zeigt das Szenario *niedriger CFK-Anteil*, der zweite gestapelte Balken zeigt das Szenario *mittlerer CFK-Anteil*, und der dritte gestapelte Balken zeigt das Szenario *hoher CFK-Anteil*.

Quelle: Eigene Darstellung, KIT-IIP.

2.4.4.3 Gegenüberstellung der Literatur

Vergleicht man die Ergebnisse mit denen der Vorgängerstudie von Zotz et al. (2019) dann wird deutlich, dass die Gesamtmenge des Abfallaufkommens aus der Materialklasse GFK/CFK deutlich über der dort ermittelten Abfallmenge von 59.349 t liegt. Die Ergebnisse von Rechnung 2 liegen mit 211.721 t über dreimal so hoch. Betrachtet man jedoch nur das in dieser Studie prognostizierte CFK, dann liegt das Abfallaufkommen von 16.190 t bei 27 % der prognostizierten Gesamtmenge der Vorstudie.

Abbildung 75: Vergleich der Abfallprognosen aktuelle Studie und Vorgängerstudie von Zotz et al. 2019; kumulierte CFK-Abfallmenge: (Rechnung 2, CFK aus GFK/CFK, Material- und Leistungsklassen).



Quelle: Eigene Darstellung, KIT-IIP.

Außerdem wird deutlich, dass es schwer ist die Zahlen miteinander zu vergleichen, da Zotz et al. (2019) nicht nach GFK und CFK in der Gesamtmenge unterschieden haben und nicht eindeutig ist, ob die dort angegebenen Zahlen sich auf die Summe von GFK und CFK oder nur auf den CFK-Anteil des Abfallaufkommens beziehen.

2.4.5 Erwartete regionale Verteilung des kumulierten Rotorblattaufkommens bis 2040 in Deutschland

Dieser Abschnitt zeigt die räumliche Analyse (Abbildung 76) des erwarteten Abfallaufkommens aus Rotorblättern auf detaillierter, regionaler Ebene (Postleitzahlgebiete) in Deutschland. Die Darstellung zeigt die kumulierten, absoluten Abfallmengen je Postleitzahlgebiet. Die Einfärbung der Postleitzahlgebiete ist nicht auf ihre jeweilige Größe der Postleitzahlgebiete normiert und gibt somit keine Hinweise über die Dichte der WEA bzw. des Rotorblattaufkommens.

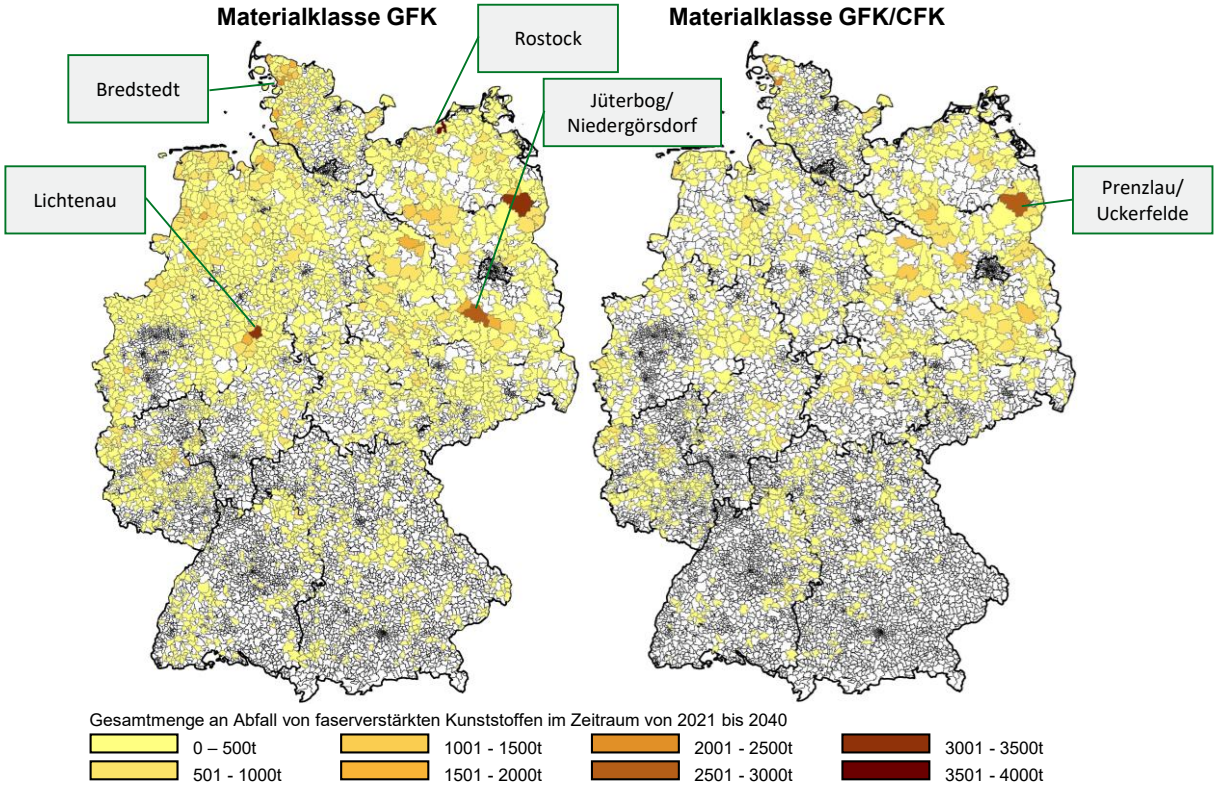
In der Materialklasse GFK gibt es fünf Postleitzahlengebiete in denen bis 2040 mehr als 2.000 t GFK anfallen. Dies sind Rostock (3.531 t), Prenzlau (3.400 t), Lichtenau (3.133 t), Jüterbog (2.710 t) und Bredstedt (2.190 t). Auf Ebene der Bundesländer fallen in diesem Zeitraum die meisten GFK-Abfälle in Niedersachsen (81.288 t), Nordrhein-Westfalen (42.571 t) und Schleswig-Holstein (41.360 t) an.

Die räumliche Analyse für die Materialklasse GFK/CFK zeigt, dass nur zwei Postleitzahlengebiete bis 2040 die Menge von 2.000 t Abfall überschreiten. Dies sind Prenzlau (2.504 t) und Bredstedt (2.469 t). Auf Länderebene fallen die meisten Abfälle der GFK/CFK-Materialklasse in Brandenburg (34.159 t), Niedersachsen (30.017 t) und Schleswig-Holstein (18.252 t) an.

Prenzlau (Brandenburg) und Bredstedt (Schleswig-Holstein) sind lokale Zentren, in denen der größte Teil der faserverstärkten Kunststoffabfälle aus beiden Materialklassen anfällt. Die räumliche Analyse zeigt zudem, dass WEA mit GFK-Rotorblättern weiterverbreitet sind als solche mit GFK/CFK-Rotorblättern. Dies ist plausibel, da die Verwendung von CFK erst 2001 begonnen wurde (Sommer et al. 2020).

Abbildung 76 zeigt keinen regionalen Trend bei der Anwendung eines Materials bzw. dem erwarteten Abfallaufkommen. In Norddeutschland befinden sich jedoch mehr WEA, sodass dort mehr GFK-Abfälle von Rotorblättern entstehen werden.

Abbildung 76: Erwartete kumulierte Abfallmenge zwischen 2021 und 2040 von faserverstärkten Kunststoffen [in Tonnen] aus Rotorblättern des deutschen WEA-Bestandes in regionaler Auflösung (PLZ-Gebiete).



Quelle: Eigene Darstellung, KIT-IIP.

2.4.6 Zusammenfassung

Aus den vorgestellten Regressionen lässt sich erkennen (vgl. Tabelle 17), dass sich bis 2040 zwischen 325.726 bis 429.525 t GFK-Abfälle aus GFK-Rotorblättern in Deutschland ansammeln werden. Im gleichen Zeitraum ergeben die durchgeführten Analysen zu erwartende Abfallmengen für faserverstärkte Kunststoffe von 76.927 bis 211.721 t aus CFK-haltigen Rotorblättern. Zudem zeigt die Analyse, dass je nach Berechnung 11 bis 32 % der Windkraftanlagen in Deutschland Rotorblätter mit CFK/GFK-Material besitzen.

Tabelle 17: Überblick über die durchgeführten Rechnungen, die zugrundeliegenden Annahmen und die Berechnungsergebnisse.

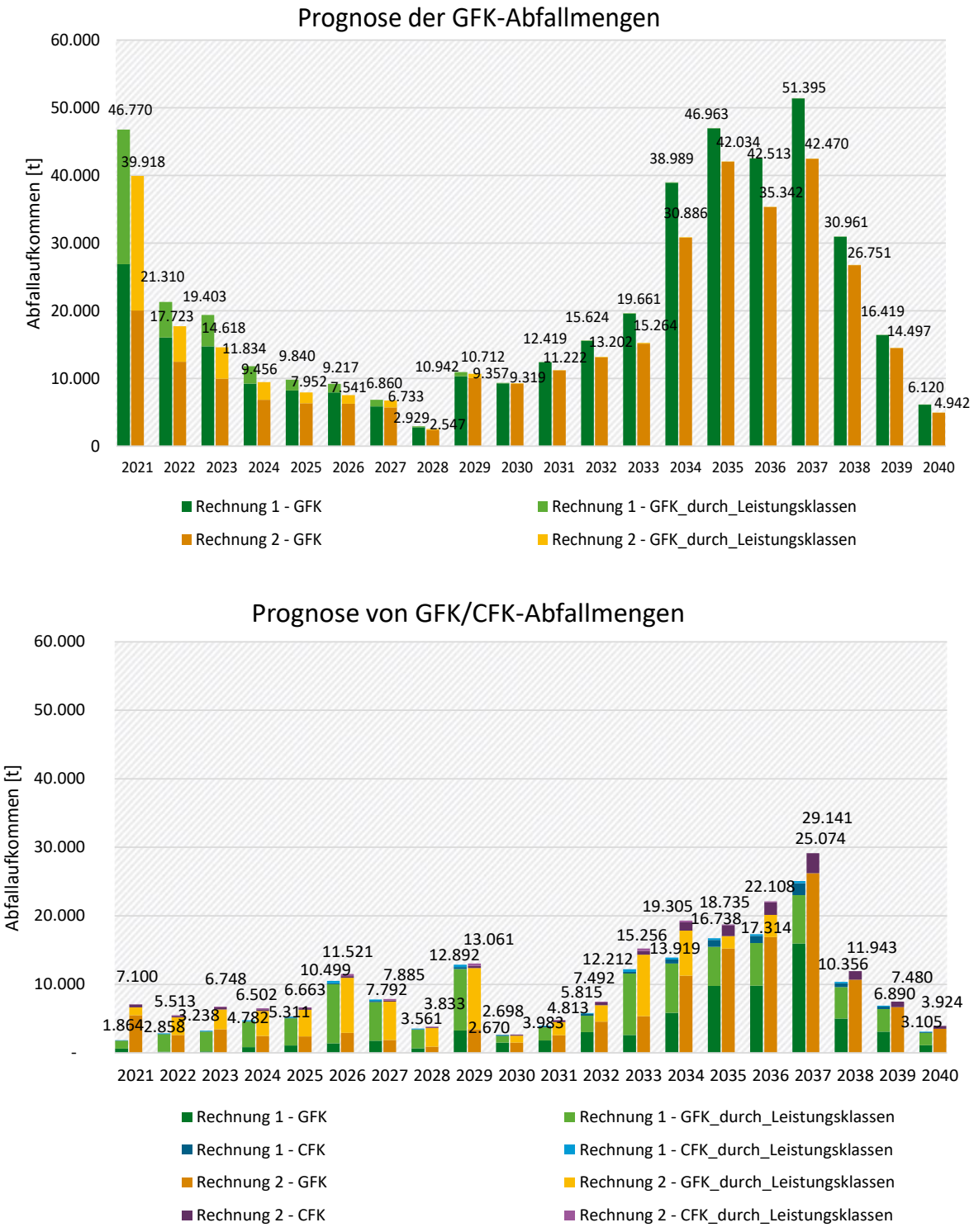
Rechnungen	1 M	1 M & P	2 M	2 M & P	3 M	3 M & P	Zotz et al. 2019	Sommer et al. 2020
Methode								
Verwend. Regressions-fkt.	Sommer et al. 2020	Sommer et al. 2020	Eigene Funktion	Eigene Funktion	Eigene Funktion	Eigene Funktion	-	Sommer et al. 2020

Rechnungen	1 M	1 M & P	2 M	2 M & P	3 M	3 M & P	Zotz et al. 2019	Sommer et al. 2020
Verwend. Leistungs-klassen-ansatz	-	Liu und Barlow 2017	-	Liu und Barlow 2017	-	Liu und Barlow 2017	Cluster-basiert***	Liu und Barlow 2017; Albers et al. 2009
Annahmen								
Erwartete Lebens-dauer	20 Jahre	20 Jahre	20 Jahre	20 Jahre	20 Jahre	20 Jahre	20 Jahre	Verteilung **
Rotorblätter in Betrieb und älter als 20 Jahre	Rückbau in 2021	Rückbau in 2021	Rückbau in 2021	Rückbau in 2021	Rückbau in 2021	Rückbau in 2021	Rückbau in 2021	-
Ergebnisse								
CFK-Anteil [%] pro Rotorblatt-gewicht (Ø)	7 %	7 %	7 %	7 %	5 %; 7 %; 17 %	5 %; 7 %; 17 %	10 % - 20 %	2.3 % - 5 %
Abfall GFK [in Tonnen] (bis 2040)	392.124 t	429.525 t	325.726 t	363.127 t	325.726 t (=regr. II)	363.127 t (=regr. II)	700.045 t	552,501* t (bis 2030)
Abfall CFK/GFK (bis 2040)	76.927 t	170.872 t	143.832 t	211.721 t	143.832 t (=regr. II)	211.721 t (=regr. II)	59.349 t	17.757* t (bis 2030)
Result. Anteil [%] WEA mit CFK/GFK Rotorblättern	11 %	21 %	24 %	32 %	24 %	32 %	23 %	29 % (Windparks)

Anmerkungen: M: basiert auf der Abschätzung anhand der Materialzuordnung. P: basiert zusätzlich auf der Abschätzung anhand der Leistungsklasse. *: Sie unterscheiden zwischen Fasertypen und nicht zwischen Materialklassen. **: Lebensdauerverteilung von N(μ;σ2) = N(17.08, 12.67). ***: Cluster nach Leistungsklasse und Rotorblattlänge; -: keine Angabe.

Quelle: Eigene Zusammenstellung, KIT-IIP.

Abbildung 77: Prognose der GFK-Abfallmengen (oben) und der CFK/GFK-Abfallmengen (unten) aus Rotorblättern in Deutschland im Zeitverlauf (Vergleich von Rechnung 1 und 2).



Anmerkungen: Rechnung 1 ist jeweils der linke gestapelte Balken je Jahreszahl und Rechnung 2 ist jeweils der rechte gestapelte Balken je Jahreszahl.

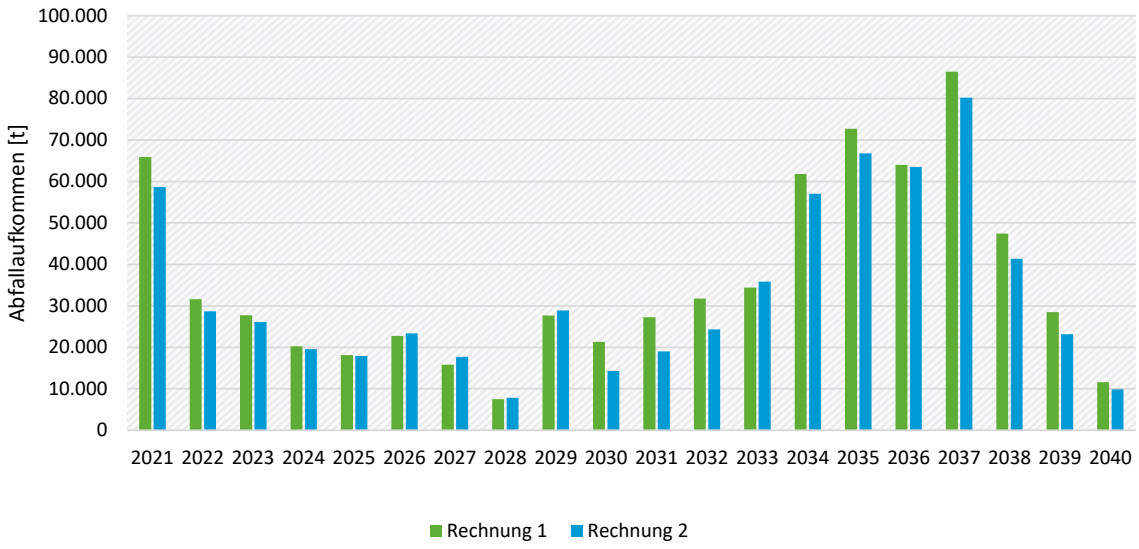
Quelle: Eigene Darstellung, KIT-IIP.

Der zeitliche Verlauf der Abfallmengen ist in Abbildung 77 ersichtlich. Dabei ist ein deutlicher Anstieg der Abfallmengen in beiden Materialklassen Anfang der 2030er-Jahre zu erkennen

sowie der Beitrag der WEA die nur per Leistungsklasse zugeordnet wurden. Die hohe Abfallmenge in 2021 resultiert aus der Annahme, dass alle WEA älter als 20 Jahre in 2021 zurückgebaut werden. Dies könnte zumindest für die Anlagen zutreffen, die nach 20-jähriger Förderung aus der EEG-Förderung herausfallen und für die ein Weiterbetrieb unter den aktuellen ökonomischen Rahmenbedingungen (Elektrizitätspreis) nicht wirtschaftlich ist. Dies betrifft geschätzt ca. 5.000 bis 6.000 WEA in Deutschland in 2021 (Eenews 2019); IPH 2018; Wallasch et al. 2017), gefolgt von 1.000-2.000 WEA jährlich in den kommenden Jahren (Eenews 2019). Bis 2025 werden weitere 8,000 WEA aus der EEG-Förderung fallen (Institut für Integrierte Produktion Hannover 2018). Ebenfalls zu sehen sind die Faseranteile in der CFK/GFK-Abfallmenge (Abbildung 77, unten).

Abbildung 78 zeigt die Prognose der gesamten Abfallmengen aus Rotorblättern in Deutschland im Zeitverlauf und im Vergleich basierend auf den beiden Rechnungen 1 und 2. Diese Abfallmengen enthalten zusätzlich zu den vorher im Fokus stehenden faserverstärkten Kunststoffen auch Metalle, Core-Materialien, Klebstoffe und Lacke/Farben basierend auf den entsprechenden Regressionsfunktionen in Sommer et al. (2020). Die Regressionsfunktionen für diese Materialien (alle außer den faserverstärkten Kunststoffen) wurden dazu unverändert von Sommer et al. (2020) übernommen. Der Verlauf der gesamten Abfallmengen ähnelt dem Verlauf der GFK-Abfallmengen sehr stark (vgl. Abbildung 77).

Abbildung 78: Prognose der gesamten Abfallmengen aus Rotorblättern in Deutschland im Zeitverlauf (Vergleich von Rechnung 1 und 2), inkl. faserverstärkte Kunststoffe, Metalle, Core-Materialien, Klebstoffe und Lacke/Farben.



Quelle: Eigene Darstellung, KIT-IIP.

2.5 Kritische Würdigung der Aufkommensabschätzung

Eine allgemeine Herangehensweise zur Quantifizierung von Rotorblattabfällen ist kompliziert, da die Datenverfügbarkeit auf nationaler Ebene variiert. Diese Studie ist an den deutschen Fall angepasst und zeigt, dass Prognosen auch bei eingeschränkter Datenlage möglich und aussagekräftig sind, solange die Datenlücken und Unsicherheiten in der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt werden. Die Berechnungen und die Ergebnisse werden im Folgenden kritisch diskutiert.

2.5.1 Unsicherheiten

Die größten Unsicherheiten bestehen in der Bestimmung des Anteils an CFK-haltigen Rotorblättern sowie des Anteils an CFK je Rotorblatt. Um der Unsicherheit der Bestimmung der CFK-haltigen Rotorblätter zu begegnen, wurde der MaStR-Datensatz aufwändig erweitert und es wurden bestehende Regressionsfunktionen aus der Literatur (entwickelt für Europa) auf den WEA-Bestand in Deutschland angepasst. Zusätzlich wurden die Berechnungen mit groben Daumenregeln verglichen, wie bspw. der Schätzung von 9,57 bis 10 t faserverstärkter Kunststoffe aus Rotorblättern pro MW installierter Leistung (Pehlken et al. 2017; Arias 2016). Dabei wurde offensichtlich, dass die Regressionskurven bzw. Angaben für grobe Daumenregeln in der Literatur insbesondere für längere Rotorblätter voneinander abweichen. Dies führt zu unterschiedlichen Schätzungen der Abfallmengen. Bei den zugrundeliegenden Regressionskurven dieser Studie ist zu beachten, dass diese flacher verlaufen als vergleichbare Kurven in der Literatur. Dies macht sich insbesondere bei längeren Rotorblättern bemerkbar, da hier die Regressionskurven weiter auseinanderklaffen. An dieser Stelle besteht Forschungsbedarf um die Datenlücken über die Materialzusammensetzung besonders von längeren Rotorblättern zu schließen und damit zu präziseren Regressionskurven und Abfallprognosen zu kommen. Die angepasste Regressionskurve zur Abschätzung von CFK-Abfallmengen in dieser Studie basiert auf frei verfügbaren, manuell recherchierten und ausgewerteten Daten zu 13 GFK/CFK-haltigen Rotorblättern. Eine Erweiterung dieser Datengrundlage ist unbedingt notwendig, um die Prognosequalität zu verbessern. Eine umfassende Recherche hinsichtlich weiterer verlässlicher Datensätze hatte jedoch keinen Erfolg. Um der Unsicherheit des CFK-Anteils je Rotorblatt zu begegnen, wurden in Rechnung 3 drei Szenarien mit unterschiedlichen CFK-Anteilen berechnet und so der Einfluss dieser Unsicherheit auf die geschätzten Abfallmengen entsprechend dargestellt. Weitere Unsicherheit besteht in der Herausbildung eines Second-Use-Marktes sowie über die Anzahl an WEA bzw. Rotorblättern, die in eine Zweitnutzung an einem anderen Standort gehen und damit (in Deutschland) nicht als Abfallmenge erwartet werden können (vgl. Abschnitt 2.5.4).

2.5.2 Granularität der Materialzusammensetzung

Bei der Recherche von vorhandenen Regressionsmodellen für Option C ist deutlich geworden, dass die bisherigen Studien einerseits zwischen Hauptmaterialien wie faserverstärkten Kunststoffen, Metallen, Materialien für den Kern der Rotorblätter, Klebstoffen und Farben unterscheiden (Sommer et al. 2020) und andererseits zwischen der Getriebeart der WEA in Synchrongenerator mit Direktantrieb (DDSG) sowie in den doppelt gespeisten Induktionsgenerator (DFIG) differenzieren (Andersen et al. 2016). Der Großteil der identifizierten Studien unterscheidet bei den faserverstärkten Kunststoffen nicht zwischen Verstärkungen mit Glasfasern und mit Carbonfasern (Andersen et al. 2016; Sommer et al. 2020), oder nimmt eine weitere Unterscheidung nach Fasertypen innerhalb von GFK oder CFK vor. Auch Produktdatenblätter und LCAs unterscheiden nicht zwingend in einer größeren Detailtiefe (Pereg und de la Hoz 2013). Die bisherigen Rechercheergebnisse lassen darauf schließen, dass diese Detailtiefe nur im Gespräch mit den Herstellern, Reparateuren, Aufbereitern und Entsorgern erreicht werden kann.

2.5.3 Datenlücken im MaStR

In Abschnitt 2.3.1 wird beschrieben, dass für die Abschätzung der Abfallmengen der Auszug „Erweiterten Einheitenübersicht“ des MaStR herangezogen wurde. Die Analyse der dort vorhandenen Daten hat gezeigt, dass hier auch nach der Datenaufbereitung und -ergänzung teilweise deutliche Datenlücken für die recyclingrelevanten Eigenschaften existieren. Die

Datenlücken konnten jedoch für die Eigenschaften *Hersteller* der WEA und für die *Typenbezeichnungen* teilweise geschlossen werden. Dennoch fehlen diese Einträge immer noch bei 24 % der WEA die in der „Erweiterten Einheitenübersicht" im MaStR eingetragenen sind.

Die Datenlücken bei der Eigenschaft des *Rotordurchmessers* sind ebenfalls hervorzuheben, da diese Eigenschaft essentiell für die Abschätzung der Materialmengen ist. Bei 64 % der Einträge wurden keine Angaben zum Rotordurchmesser gemacht. Diese Datenlücke konnte mit der Annahme, dass WEA vom gleichen Typ und Hersteller auch den gleichen Rotordurchmesser haben, teilweise geschlossen werden. Ausgehend von dieser Annahme konnten die Ergebnisse der Datenergänzung des WEA-Typs genutzt und die Datenlücke ebenfalls auf 25 % gesenkt werden. Zudem konnten Zusammenhänge zwischen *Datum der Inbetriebnahme* (Alter der WEA) und *Rotordurchmesser* hergestellt werden. Dennoch werden durch die fehlenden Daten die Clusterung nach dem Rotordurchmesser oder das Nutzen von Regressionsmodellen, die die verbauten Materialmengen in Abhängigkeit des Rotordurchmessers berechnen, erschwert. Für die Abschätzung des zukünftigen Abfallaufkommens wird empfohlen, im MaStR darauf zu achten, dass die Eigenschaft *Rotordurchmesser* für alle WEA vorhanden ist.

Zudem sollten für die Abschätzung des zukünftigen Abfallaufkommens anhand des MaStR für alle WEA weitere Eigenschaften und Informationen vollständig vorliegen. Fehlende Datensätze im MaStR für die Abschätzung der Abfallmengen aus Rotorblättern sind die Eigenschaften *Individuelles Rotorblattgewicht* und *Hauptmaterial der Rotorblätter*. Diese werden aktuell nicht erfasst. Durch die o. g. Recherchen und Berechnungen konnten hinsichtlich *Individuelles Rotorblattgewicht* ca. 30 % der Angaben bzw. hinsichtlich *Hauptmaterial der Rotorblätter* ca. 73% ermittelt werden. Die verbleibenden Datenlücken wurden mit Näherungen über die Eigenschaft *Nennleistung* geschlossen. Weiterhin erscheint die Angabe der Eigenschaft *Getriebeart* sinnvoll. Andersen et al. (2016) zufolge hat die Getriebeart eine deutliche Auswirkung auf das Rotorblattgewicht, insbesondere bei längeren Rotorblättern. Für die Abschätzung der Abfallmengen aus Rotorblättern wären neben dem *Hauptmaterial der Rotorblätter* zudem Informationen zur genauen Materialzusammensetzung bzw. als Stücklisten, technische Konstruktionszeichnungen der Rotorblätter oder Rückbau-/Demontageanleitungen) hilfreich. Die derzeitigen Angaben des MaStR genügen nicht, um die zu erwartenden Abfallmengen präzise zu ermitteln.

Weitere Datenlücken im MaStR-Auszug, die adressiert werden müssten, betreffen die regionale Auflösung des Materialaufkommens. Die Auflösung nach Postleitzahlgebieten ist mit der erarbeiteten Datengrundlage nicht für alle WEA möglich. Da die Daten aber nur bei 588 WEA fehlen, ist diese Datenlücke überschaubar. Die Datenlage im MaStR erlaubt Clusterungen und Auswertung basierend auf der Nennleistung und des Inbetriebnahmedatums (wie in Option C skizziert), da diese Daten vollständig vorhanden sind.

Die eben beschriebenen Problematiken und Lösungsansätze der Datenanalyse beziehen sich auf die MaStR Datenbank „Erweiterte Einheitenübersicht". Die zweite Datenbank „Aktuelle Einheitenübersicht" weist zwar einen komplettierten Datensatz zu relevanten Informationen wie Nabenhöhe und Rotordurchmesser auf, bietet aber keine Möglichkeit des Datenexports. Diese Informationen sind unter den Details nur einzeln je SEE unter dem Reiter „Technische Daten" zu finden und verfügen analog zur bereits erklärten „Erweiterten Einheitenübersicht" nicht über relevante Informationen zu Konstruktionen und Materialzusammensetzungen der Rotorblätter.

In Bezug auf die technischen Daten *Nabenhöhe* und *Rotorblattdurchmesser* in der „Aktuellen Einheitenübersicht" stellt sich weniger die Frage nach der Verfügbarkeit der relevanten Daten im MaStR, als vielmehr die Frage nach Datenschutz, Zugriffrecht und Benutzerfreundlichkeit. Die

stetige Ergänzung und Korrektur des MaStR durch die Bundesnetzagentur könnte in Kombination mit möglichen erweiterten Zugriffsrechten auf die Datenbank „Aktuelle Einheitenübersicht“ eine wertvolle Grundlage für zukünftige Aufkommensabschätzungen von Abfall aus Rotorblättern darstellen. Unter diesem Gesichtspunkt wird empfohlen, dass die Bundesnetzagentur bei der Verbesserung des MaStR neben der Ergänzung von konstruktionsspezifischen Informationen zu Rotorblättern auch Benutzerfreundlichkeit und Möglichkeit von erweiterten Zugriffsrechten in Betracht ziehen sollte. Dadurch wäre es möglich, zukünftige Aufkommensanalysen auf Basis der Datenbank „Aktuelle Einheitenübersicht“ durchzuführen. Weiterhin würde dies eine deutliche Reduzierung der Unsicherheiten bewirken und somit die Vorhersagequalität der Aufkommensabschätzung basierend auf dem MaStR steigern.

2.5.4 Second-use-Markt von Rotorblättern

Der Markt für gebrauchte Rotorblätter wird in dieser Studie aufgrund mangelnder Daten nicht betrachtet. Gebrauchte Rotorblätter sind auf unterschiedlichen Plattformen verfügbar, die weltweit agieren (bspw. Windturbine (2020c), BayWa r.e. (2020), Windturbine (2020c)). Im Vergleich zu ca. 30.000 WEA im Betrieb in Deutschland und ca. 345.000 WEA weltweit (Marsh 2017) ist dieser Markt sehr klein. Wie Zotz et al. (2019) und Andersen et al. (2016) vernachlässigen wir daher den Second-Use-Markt. Bei einem Weiterbetrieb von Anlagen an anderen Standorten gibt es einige Hemmnisse, die zu beachten sind. Der Second-Use-Markt im Inland ist beinahe gesättigt (Zotz et al. 2019) aufgrund alternder und abnehmender WEA durch Repowering. Der Second-Use-Markt im Ausland hat ggfs. Handelsbarrieren, Transportaufwand, technische Restriktionen sowie ggfs. mangelnde Kompetenz im Errichten und Betreiben der zunehmend komplexeren WEA (vgl. Zotz et al. (2019)).

2.5.5 Lebensdauern von WEA und Rotorblättern

Die Entwurfslebensdauer (=geplante technische Nutzungsdauer) einer WEA-Anlage „ist mit mindestens 20 Jahren anzunehmen“ (Berkhout et al.; Deutsches Institut für Bautechnik 2015; DIN EN IEC 61400-1 VDE 0127-1). „In der Regel […] [besteht ein] Interesse daran, diese Windenergieanlage auch über die geplante Nutzungsdauer hinaus weiter zu betreiben“ (Restnutzungsdauer) (Berkhout et al.). Die Lebensdauer ist abhängig von verschiedenen Faktoren (vgl. Berkhout et al.), wie:

- behördlichen und juristischen Aspekten (z. B. Nachweise der Restnutzungsdauer),
- technischen Aspekten (z. B. Ermüdung, Windlastzonen),
- wirtschaftlichen Aspekten (z. B. Kosten für Nachweisverfahren, engmaschige Überwachung, Ertüchtigungsmaßnahmen, geringere Einnahmesicherheit in Restnutzungsdauer, da nur 20 Jahre EEG-Mindestvergütung und Repowering-Entscheidungen).

Bislang wurden nur für vereinzelte WEA in Deutschland Gesamtnutzungsdauern ermittelt. Holzmueller (2014) analysierten 43 WEA, die über die Entwurfslebensdauer hinausgingen. Die Lebensdauern der untersuchten WEA reichen von 23 Jahre bis knapp über 40 Jahre. Die meisten der 43 untersuchten WEA in dieser Quelle haben eine Lebensdauer zwischen 25 und 35 Jahren. 20 WEA in diesem Datensatz sind WEA des Typs E-40/5.40 von Enercon.

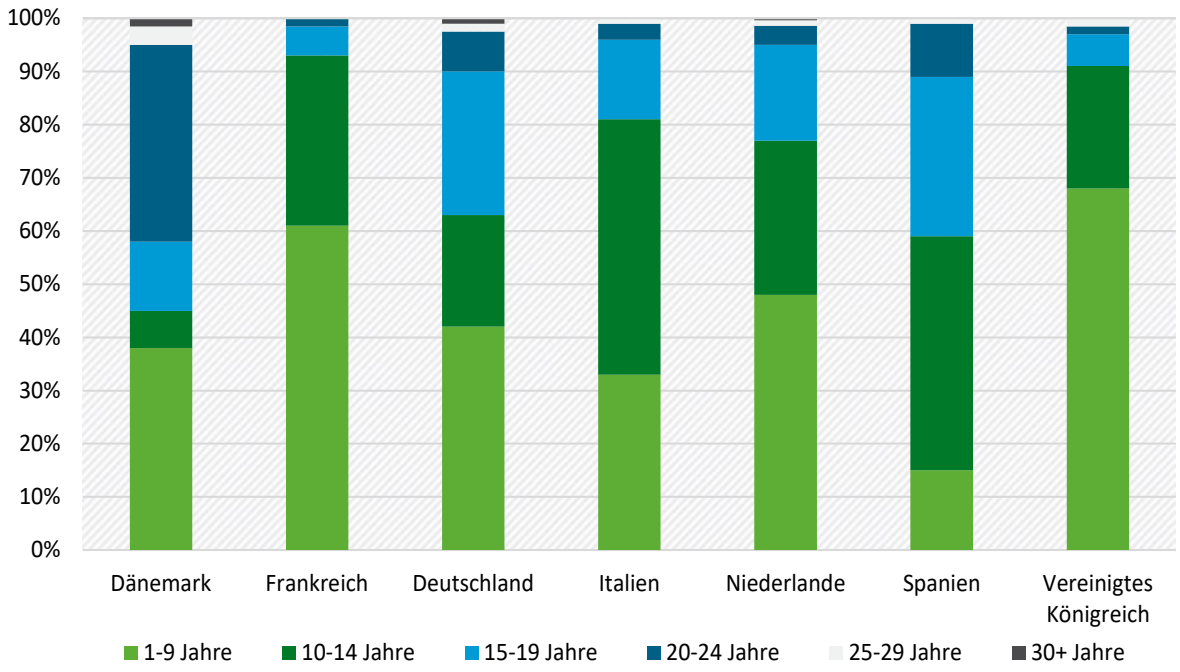
Sommer et al. (2020) analysierten 1.314 stillgelegte WEA (des MaStR) in Deutschland und fanden eine durchschnittliche Lebensdauer von 17,08 Jahren. Diese Analyse konnte allerdings von den Autoren dieser Studie anhand von MaStR-Datenauszügen nicht nachvollzogen werden. Im Rahmen dieser Studie konnte bei der Untersuchung des MaStR-Datensatzes eine

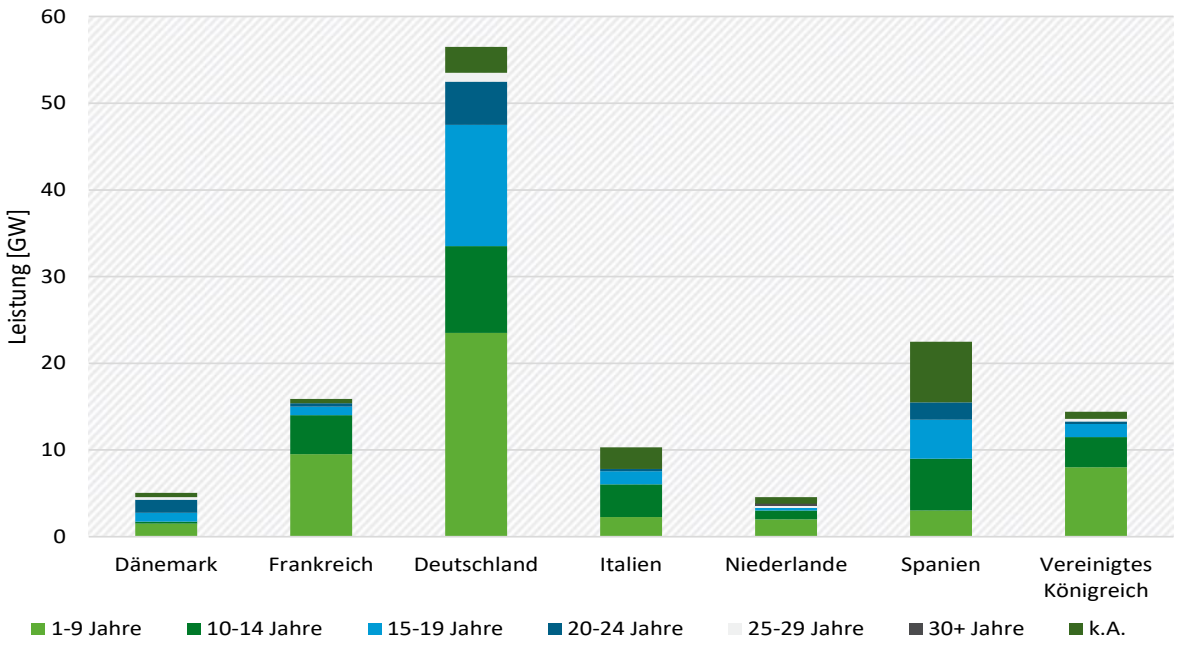
durchschnittliche Lebensdauer von 18,64 Jahren der dort aufgeführten 169 dauerhaft abgeschalteten WEA ermittelt werden. In Deutschland sind laut MaStR ca. 17 % (4.994 WEA) der in Betrieb befindlichen WEA 20 Jahre oder älter. Laut WindEurope (2020) sind es nur ca. 10 % (vgl. Kapitel 2.3.2.5). Zuverlässige statistische Daten zu tatsächlichen Lebensdauern von WEA und Rotorblättern sind derzeit nicht verfügbar.

Der internationale Vergleich zeigt, dass die Lebensdauern von WEA in Europa deutlich über 20 Jahren liegen (vgl. Abbildung 79). In Dänemark sind bereits mehr als 40% der Anlagen 20 Jahre und älter; allerdings stehen dort deutlich weniger WEA (bzgl. installierte Leistung).

Diese Studie berücksichtigt eine Lebensdauer von WEA und Rotorblättern von 20 Jahren. Lebenszeitverlängerungen sind durch individuelle Tests und behördliche Genehmigungen (s.u.) mit einigem Aufwand möglich. Zukünftige Analysen könnten Sensitivitäten mit unterschiedlichen Lebensdauern oder Szenarien mit Lebensdauerverteilungen von Rotorblättern analysieren. Die Berücksichtigung des Weiterbetriebs der WEA im Inland wird nicht notwendigerweise die Abfallmengen reduzieren, sondern die Abfallmengen in die Zukunft verlagern (Zotz et al. 2019). Eine Verkürzung der vorhergesagten Lebensdauer würde entsprechend zu einem früheren Anfall der prognostizierten Abfallmenge führen. Ersetzte Rotorblätter (bspw. aufgrund von Schäden) werden aktuell nicht berücksichtigt, da sie nur selten auftreten (zwischen 2 % und 2,4 % pro Jahr und WEA (vgl. Andersen et al. (2016)).

Abbildung 79: Prozentuale (oben) und absolute [in GW] Altersverteilung (unten) installierter onshore WEA in ausgewählten europäischen Ländern.





Quelle: Eigene Darstellung, KIT-IIP, nach WindEurope (2020), S.8f.

Eine Verlängerung der Lebensdauer und Nutzung von WEA und deren Rotorblättern in der Restnutzungsdauer (d. h. über die Entwurfslebensdauer von 20 Jahren hinaus) wird durchgeführt, allerdings ist in Deutschland laut DIBt-Richtlinie dafür ein Nachweisverfahren für jede einzelne WEA erforderlich (auch in Windparks). Dieses Nachweisverfahren umfasst die zwei folgenden Methoden:

- Analytische Methode: Der Nachweis ist erbracht, wenn die nachgewiesene Schädigung geringer ist als eine analytisch berechnete Schädigung.
- Praktische Methode: Der Nachweis ist erbracht, wenn die Ist-Zustände der Bauteile (analysiert durch Inspektionen) und eine Fehleranalyse Gefährdungen ausschließen.

Schäden können über die gesamte Lebensdauer der Anlage auftreten, die die Lebensdauer der WEA und ihrer Rotorblätter beeinträchtigen können. Je mehr Daten zur tatsächlichen Belastung der WEA (insb. Turbulenzen, Wartung- und Stillstandzeiten) bekannt sind (bspw. durch Sensoren), desto einfacher ist die Nachweisführung. Zusätzlich erscheinen regelmäßige Prüfungen bzw. kontinuierliche Zustandserfassungen von Bauteilen (bspw. über Sensoren), Fehlstellungen der Rotorblattwinkel und lastreduzierende Betriebsweisen der WEA lebensdauerverlängernd. „In der Regel sind Windenergieanlagen für das höchste Turbulenzniveau nachgewiesen, denn nur dadurch ist gesichert, dass die Anlagen an jedem beliebigen Standort in der BRD errichtet werden können." (Berkhout et al.) Daher kann je nach WEA- und Rotorblattauslegung sowie je Standort der WEA in einer der Windlastzonen durch solche Nachweise eine nicht unerhebliche Restnutzungsdauer erreicht werden. Schätzungen gehen davon aus, dass WEA, die für die Windlastzone 3 (mittlere Windgeschwindigkeit 27,5 m/s) ausgelegt sind, in der Windlastzone 2 (mittlere Windgeschwindigkeit 25 m/s) ca. drei bis sechs Jahre weiterbetrieben werden können und in der Windlastzone 1 (mittlere Windgeschwindigkeit 22,5 m/s) sogar mehr als 10 Jahre (Berkhout et al.). WEA an weniger turbulenten Standorten und an Standorten in geringeren Windlastzonen haben voraussichtlich das größte Potential zum Weiterbetrieb nach 20 Jahren.

Ein Verschnitt des aktuellen Anlagenbestands mit den Windlastzonen in Deutschland bspw. anhand der Daten von DEHN Deutschland (2020) wäre auf PLZ-Ebene möglich, um das Potential zur Lebensdauerverlängerung grob abzuschätzen. Allerdings ist bei der Verlängerung der Lebensdauer nicht nur die Windlastzone ausschlaggebend, sondern auch die Geländekategorie[6], die Objekthöhe der WEA, die Standorthöhe, die Verfügbarkeit der WEA sowie die Turbulenz. Anhand der Daten des MaStR könnten die Geländekategorie, die Objekthöhe (Eigenschaft *Nabenhöhe*) und die Standorthöhe (bspw. über ein Geländemodell) abgeschätzt werden. Lediglich die Verfügbarkeit und die lokalen Turbulenzen an den WEA könnten nicht und nur mittels Annahmen berücksichtigt werden. In Berkhout et al. finden sich bspw. Angaben zur Verfügbarkeit von Anlagen.

Eine Veränderung der Abfallmengen aus Rotorblättern ergibt sich durch eine geänderte Lebensdauerannahme nicht direkt. Lediglich ein indirekter Reduktionseffekt der Abfallmengen wäre möglich durch ein geringeres Repowering bzw. einen geringeren Zubau durch die Weiternutzung älterer Anlagen.

[6]Es gibt vier Geländekategorien von „dicht bebaut“ bis „freies, flaches Land“.

3 Risikobeurteilung der beim Rückbau und der Verwertung von Rotorblättern freiwerdenden Stäube und Fasern anhand von Gefährlichkeit und Exposition

3.1 Einleitung

Im Rahmen dieses Kapitels wird, soweit auf der aktuellen Datenbasis (Stand 2022) möglich, eine Risikobeurteilung der beim Rückbau und der Verwertung von Rotorblätterabfällen freiwerdenden Stäube und Fasern durchgeführt. Diese Betrachtungen erfolgen anhand einer ausführlichen Literaturrecherche zum Stand des Wissens, unter Fokussierung auf die nachfolgenden Materialien, die in Rotorblättern verbaut sind:

- Glasfasern
- Carbonfasern
- Basalt-, Aramid- und Naturfasern
- Lacken und Beschichtungen.

In dieser Literaturrecherche werden Publikationen mit Informationen zu den betreffenden Materialien insbesondere bezüglich human- und ökotoxikologischer Gesichtspunkte ausgewertet.

In einem ersten Arbeitsschritt werden Kriterien auf Basis einer Literaturrecherche entwickelt, die eine Risikobeurteilung von freiwerdenden Fasern und Stäuben beim Rückbau und der Verwertung von Rotorblättern erlauben. Im darauffolgenden Arbeitsschritt werden detaillierte Informationen, insbesondere aus der baustellenseitigen Rotorblattzerkleinerung (siehe Kapitel 4) und der Aufbereitung der Rotorblattabfälle (siehe Kapitel 5) benötigt. Es fließen aber auch Informationen aus diesem Kapitel in die anderen ein, was insbesondere für die Kapitel 4 und 5 von Bedeutung sein kann, falls bestimmte Verfahren und Methoden entsprechend den Daten aus der toxikologischen Betrachtung geändert, angepasst oder optimiert werden sollten.

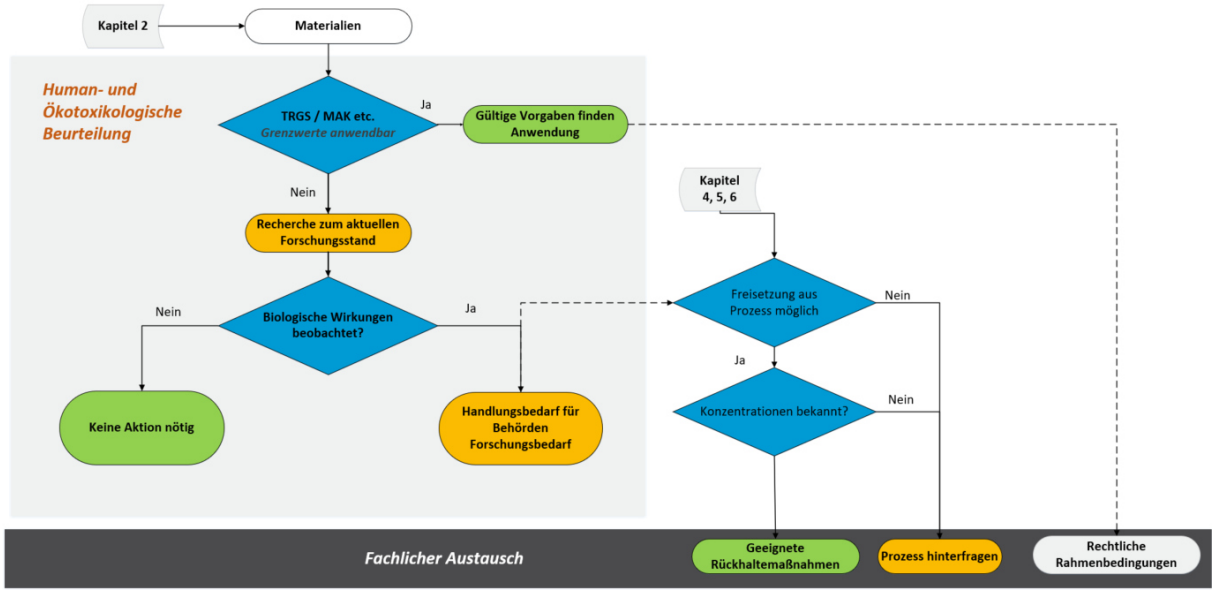
Im abschließenden Arbeitsschritt des Kapitels 3 fließen Ergebnisse aus Kapitel 6 zur Verwertung ein und werden bezüglich der Organisationsverantwortung (Kapitel 7) abgestimmt.

3.2 Methodisches Vorgehen

Für eine Beurteilung des Risikos, das von Fasern und Stäuben bei der Zerkleinerung und Verwertung der Rotorblätter ausgehen kann, wird ein methodisches Vorgehen benötigt.

Das Schema in Abbildung 80 zeigt den Ablauf dieser methodischen Vorgehensweise, die für alle maßgeblich in Kapitel 2 genannten Materialien eines Rotorblatts in Kapitel 3 erfolgt. Für die Materialien aus Kapitel 2 wird der aktuelle Stand an Vorgaben, Richtlinien und Grenzwerten geprüft. Liegen geeignete Vorgaben und Richtlinien zum Umgang mit diesen Materialien vor, so finden diese entsprechend Anwendung. Dies gilt sowohl für die in der Abbildung angeführten Richtlinien für Arbeitsplätze, als auch für weitere Aspekte, wie den Umweltschutz. Fehlen solche Vorgaben, so wird der aktuelle Forschungsstand geprüft und zusammengefasst. Wurden dabei biologische Wirkungen an Mensch oder Umwelt beobachtet, wird der Handlungsbedarf basierend darauf definiert bzw. ein Vorgehen vorgeschlagen. Stehen diese Daten nicht zur Verfügung, werden Empfehlungen für die Schließung der Datenlücken formuliert.

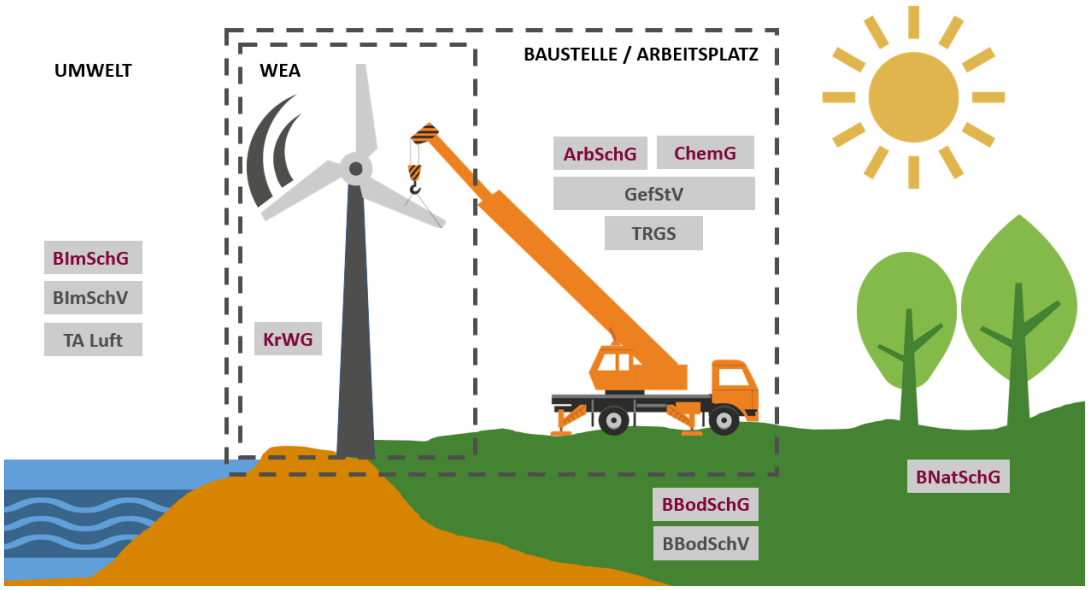
Abbildung 80: Ablaufschema zur Risikobeurteilung der beim Rückbau und der Verwertung von Rotorblättern freiwerdenden Stäube und Fasern anhand von Gefährlichkeit und Exposition.



Quelle: Eigene Darstellung, KIT-ITC.

Ziel ist die Erstellung einer Matrix zu den zu betrachtenden Materialien und den Ergebnissen der Literaturrecherche. Diese soll in Kombination mit den Ergebnissen die beiden Parameter „Toxizität“ und „Exposition“ der Risikogleichung stellen, um bei möglichen Expositionen eine Abschätzung eines möglichen Risikos zu erlauben. Die möglichen Expositionen hängen von den betrachteten Prozessen des Rotorblattrückbaus, der Aufbreitung und Verwertung, der dabei anfallenden Abfallströme aus den Kapiteln 4 bis 6 ab.

Abbildung 81: Schematische Zusammenfassung einiger relevanter, nationaler Gesetze und Regularien beim Abbau eines Rotorblatts am Standort der Windenergieanlage (WEA).



Quelle: Eigene Darstellung, KIT-ITC.

Während des Rückbau- und Verwertungsprozesses der Rotorblätter kommen an den unterschiedlichen Standorten verschiedenste rechtliche Randbedingungen zum Tragen, die in Abbildung 81 exemplarisch für den Aufstellort der WEA dargestellt sind. Je nach Gesichtspunkt, zum Beispiel Arbeitsschutz oder Umweltschutz, müssen bei der Auswahl geeigneter Grenzwerte für die Beurteilung verschiedene Regeln Anwendung finden. Dies führt dazu, dass im Folgenden je nach Betrachtung entweder TRGS als auch andere Richtlinien herangezogen werden.

Die Gesetz-, Verordnungs- und Richtlinien-Hierarchie beginnt in der obersten Ebene mit den Europäischen Verordnungen, die von der BRD sowie den anderen EU-Staaten ratifiziert und damit zu nationalem Recht geworden sind. Konkret greift hier die Europäische Kommission 16.12.2008 über die Einstufung, Kennzeichnung und Verpackung (CLP) von Stoffen und Gemischen. Sie beruht auf dem Global Harmonisierten System der Vereinten Nationen (GHS) und ersetzt die Richtlinie über gefährliche Zubereitungen Europäische Kommission 31.05.1999 und die Europäische Kommission 30.05.2008 (REACH). Seit dem 1. Juni 2015 ist die CLP die einzige geltende Gesetzgebung für die Einstufung und Kennzeichnung von Stoffen und Gemischen in der EU. In allen Wirtschaftszweigen werden Hersteller, Importeure und nachgeschaltete Anwender von Stoffen oder Gemischen zur ordnungsgemäßen Einstufung, Kennzeichnung und Verpackung ihrer gefährlichen Chemikalien vor dem Inverkehrbringen verpflichtet.

3.3 Definition relevanter Begriffe

Bei der Bearbeitung einer „Risikobeurteilung von Fasern und Stäuben“ ist die Verwendung klar definierter Begriffe unerlässlich, was schon bezüglich der hier formulierten Fragestellung mit allen drei darin enthaltenen Begriffen zu Diskussionen führen kann. Zunächst ist hier eine Unterscheidung von Fasern und Stäuben notwendig, die bei der baustellenseitigen Abfallbehandlung, deren Aufbereitung und Verwertung von Rotorblättern anfallen. Eine Unterteilung für Fasern in anorganisch und organisch, mit detaillierter Gruppierung, ist insbesondere in der älteren Ausführung der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA) (Technische Regeln für Gefahrstoffe, TRGS) enthalten, aber auch in der VDI-Richtlinie 3469 (Verein Deutscher Ingenieure, VDI).

3.3.1 Definition Faser, Partikel und Faserstaub

Je nach Community oder verantwortlichem Regelungsbereich, z. B. EU, WHO, etc., gibt es unterschiedliche Definitionen. Im Folgenden sind die im Rahmen dieses Berichts relevanten Definitionen zusammengestellt.

Im Rahmen dieses Berichts wird unter einer **Faser** gemäß der Europäische Kommission 23.07.2009 ein Objekt mit einem Aspektverhältnis ≥ 3 verstanden. Dabei beschreibt das Aspektverhältnis das Verhältnis der Objektlänge L zum Objektdurchmesser D (oder der Objektdicke). Demgegenüber sind alle Objekte mit einem Aspektverhältnis < 3 als **Partikel** aufzufassen. Eingeengt wird die Faser-Definition im Weiteren für inhalierbare Fasern, wobei hier die WHO-Definition angewendet wird (siehe Kapitel 3.3.2 zur Eindringtiefe in den Atemtrakt).

Bezüglich Arbeitsplatzmessungen ist unter Umständen eine klare Unterscheidung zwischen Fasern und Stäuben schwierig, da man in verschiedenen Richtlinien und Regelwerken weitere Unterteilungen findet. Bezüglich den in diesem Kapitel durchgeführten Recherchen kommt man schnell zum Begriff Faserstäube, der in etlichen Regelwerken verwendet wird.

In der VDI-Richtlinie 3469 “Emissionsminderung bei der Herstellung und Verarbeitung von faserhaltigen Materialien“ sind etliche im Weiteren relevante Begriffsdefinitionen enthalten, was

insbesondere die Faserdefinition, Fasereingruppierung (natürlich, synthetisch, anorganisch und organisch) und Einteilung von Stäuben, wie Faserstäube bzw. faserförmigen Stäuben betrifft.

Entsprechend der VDI-Richtlinie 3469 erfolgt eine Unterscheidung zwischen Faserstäuben und faserförmigen Stäuben, was bei weiteren Betrachtungen eine Rolle spielen kann. Auch der Begriff der emissionsrelevanten Faser ist dort definiert. Vereinfacht dargestellt handelt es sich bei Faserstäuben um die nach den WHO-Kriterien definierten Fraktionen, die bei der Herstellung und Verarbeitung von faserhaltigen Produkten freigesetzt werden können. Faserförmige Stäube sind in der Richtlinie als diejenigen definiert, die aus Produkten freigesetzt werden und emissionsrelevante Fasern enthalten und somit der Gesamtmenge an Partikeln und Fasern, unabhängig der Größe und Form, entsprechen.

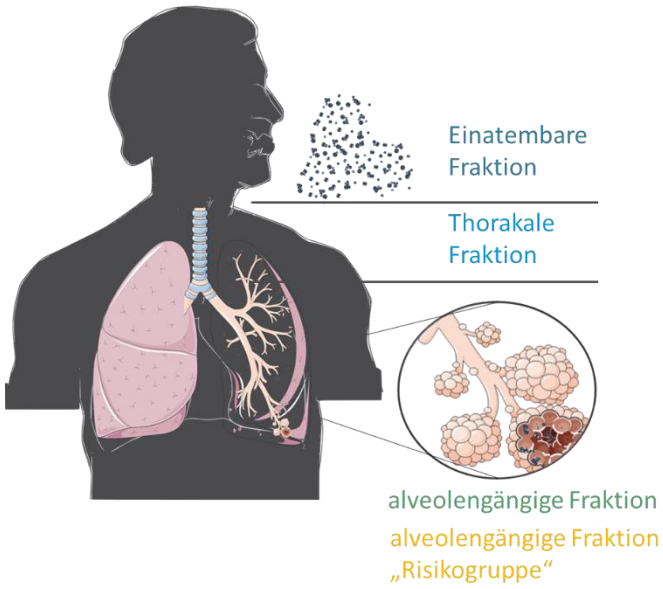
- **emissionsrelevante Fasern**
  Fasern, die nach der Europäische Kommission 16.12.2008 eingestuft sind und durch Herstellung und Bearbeitung freigesetzt werden
- **faserförmige Stäube**
  Stäube, die aus Produkten freigesetzt werden, die emissionsrelevante Fasern enthalten
- **Faserstäube**
  Stäube, die bei der Herstellung und Verarbeitung von faserhaltigen Produkten freigesetzt werden können
  Anmerkung: Dabei werden nur Fasern mit einer Länge von > 5 µm, einem Durchmesser von < 3 µm und einem Länge-Durchmesser-Verhältnis größer als 3 : 1, also WHO-Fasern, berücksichtigt.
- **Staubungsverhalten**
  Eigenschaften im Hinblick auf die mögliche Freisetzung von faserförmigen Stäuben in Anlehnung an Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA) Februar 2008.

Die Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA) Februar 2008 gilt zum Schutz der Beschäftigten und anderer Personen beim Umgang mit den als krebserzeugend eingestuften Faserstäuben, der sogenannten alten Mineralwolle. Der Umgang mit der sogenannten neuen Mineralwolle ist in der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA) 13.12.2019 geregelt. In der Vorgängerfassung der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA) Mai 2002 wird ausführlicher eine Faserunterscheidung, nach anorganischen Faserstäuben (Teil 1) und organischen Faserstäuben (Teil 2) dargelegt.

3.3.2 Definitionen für Inhalierbarkeit und Eindringtiefen in die Lunge

Bei der baustellenseitigen Abfallbehandlung, deren Aufbereitung und Verwertung von Rotorblättern fallen maßgeblich gemischte Stäube durch mechanische Beanspruchung bei der Zerkleinerung an, die bezüglich Geometrie, Materialzusammensetzung und Größenverteilung ein weites Spektrum einnehmen. Für toxikologische Betrachtungen ist nur die inhalierbare Fraktion von Bedeutung, wobei für Fasern im Allgemeinen das WHO-Kriterium herangezogen wird und für Partikel eine Trennfunktion, bezogen auf deren aerodynamischen Partikeldurchmesser. Für die toxikologische Wirkung spielt außerdem die Biobeständigkeit des betrachteten Materials eine wichtige Rolle.

Abbildung 82: Bereiche des humanen Atemtrakts zur Einteilung der Eindringtiefen von Aerosolen.



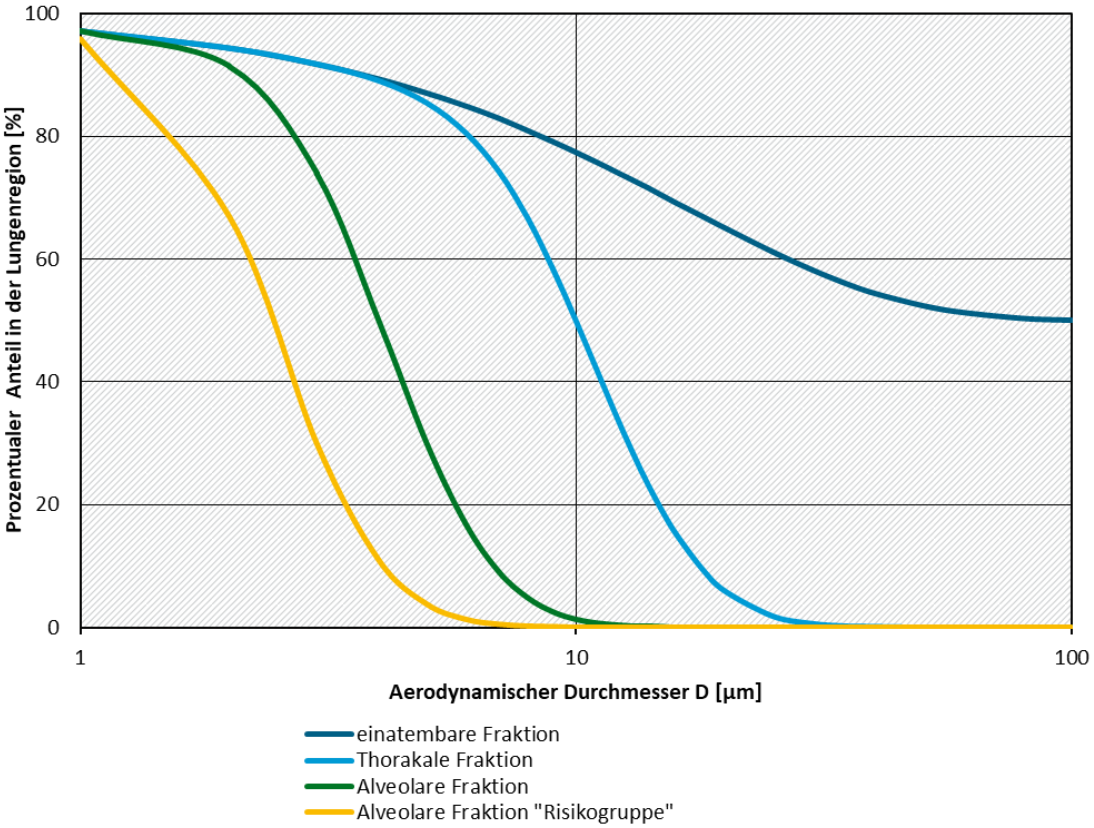
Quelle: Eigene Darstellung, KIT-ITC.

In der DIN ISO 7708 werden die Trennfunktionen der Fraktionen definiert (Abbildung 82), die in die unterschiedlichen Regionen des menschlichen Atemtrakts eindringen können und dort deponieren. Die Trennfunktionen dieser Fraktionen beschreiben die Depositionseffizienzen in den unterschiedlichen Bereichen des Atemtrakts in Abhängigkeit vom aerodynamischen Partikeldurchmesser. Die betrachteten Bereiche des Atemtrakts spiegeln sich mit ihren Bezeichnungen und den damit verbundenen Größenbereichen in einigen der Grenzwerte wider, zum Beispiel in der Unterscheidung zwischen alveolengängigem (A-Staub) und einatembarem Staub (E-Staub) im Allgemeinen Staubgrenzwert der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA) Januar 2006. Dabei schließt die DIN ISO 7708 deren Anwendung auf Fasern aus, da hierfür Festlegungen hinsichtlich der Länge und des Durchmessers nötig sind.

Basis dieser Konventionen ist das Human Respiratory Tract Model (HRTM) der Internationalen Kommission zum Schutz vor Radioaktivität ICRP, das Mitte der Neunziger-Jahre den Verbleib von radioaktiven Partikeln im menschlichen Atemtrakt in Form der Trennkurven für die unterschiedlichsten Menschen und Belastungssituationen simuliert hat (Smith 1994). Dabei wird auch darauf eingegangen, dass diese Depositionseffizienzen bzw. diese Trennkurven abhängig von der Leistungsfähigkeit der Lunge des Betroffenen sind. Die üblicherweise herangezogenen Kurven gehen von einem gesunden Erwachsenen aus. Es gibt Personengruppen die den diesen Kurven zugrundeliegenden Annahmen nicht entsprechen; diese sind Kinder, kranke und geschwächte Personen, die in der DIN ISO 7708 als „Risikogruppe“ zusammengefasst sind.

Bis heute bietet das HRTM die Basis für weitergehende Simulationen und Vergleiche zu experimentellen Studien und wird entsprechend aktualisiert (ICRP 2000).

Abbildung 83: Konvention über die einatembare, thorakale und alveolengängige Fraktion in Prozent der gesamten Schwebstoffe.



Trennkurven für die unterschiedlichen Fraktionen einatembarer Stäube. Unter der „Risikogruppe“ werden Kinder und kranke und geschwächte Personen zusammengefasst, deren Lungenfunktion nicht so ausgeprägt ist wie die eines gesunden Erwachsenen.

Quelle: Eigene Darstellung, KIT-ITC nach DIN ISO 7708.

In der DIN ISO 7708 sind Ergänzungen zur Nomenklatur und ihren zwischenzeitlich vereinheitlichten Begriffen auch in internationalen Dokumenten enthalten, die in Tabelle 18 dargelegt sind.

Tabelle 18: Internationale Nomenklatur für einatembare und alveolengängige Fraktionen.

Deutsch	Englisch	Bereich im Atemtrakt	Korrelierender Arbeitsplatz-Grenzwert	Korrelierender Immissions-Grenzwert
einatembar	inhalable	Gesamtheit aller einatembarer Partikel incl. Nasen-Rachenraum	E-Staub	
Thorakal	Thoracic	Dringt über den Kehlkopf hinaus in den Lungenbereich ein		PM10
alveolen-gängig	respirable	Dringt in den Bereich der nicht-zilierten Luftwege, also Bronchien und Alveolen ein	A-Staub	PM2,5 (PM4)

Quelle: Eigene Zusammenstellung, KIT-ITC, nach DIN ISO DIN ISO 7708.

Lungengängige Fasern sind entsprechend dem WHO-Kriterium definiert und werden als sogenannte WHO-Fasern bezeichnet, deren Länge > 5 µm, deren Durchmesser ≤ 3 µm, und deren L/D-Verhältnis > 3:1 beträgt. Das sogenannte WHO-Kriterium definiert die Inhalierbarkeit über die drei genannten geometrischen Merkmale, die ähnlich den Trennkurven für Partikel den Verbleib im menschlichen Atemtrakt abbilden. Definiert sind diese Eigenschaften in verschiedenen Richtlinien zur Messung gesundheitsschädigender Arbeitsplatzkonzentrationen an Fasern mittels mikroskopischer Auswertung von Faserproben, wie der VDI-Richtlinie 3861 - 2 und der NIOSH-Methode 7400 (Baron 2016; NIOSH Manual of Analytical Methods (NMAM) 7400).

3.3.3 Definitionen Karzinogenität und damit verbundene Einordnungen

Karzinogenität bezeichnet die Eigenschaft aller chemischen, physikalischen oder biologischen Stoffe, die direkt an der Entstehung von Krebs beteiligt sind (sie sind karzinogen) und führt zu einer erhöhten Anzahl von Tumorerkrankungen, zu einem erhöhten Anteil an bösartigen (malignen) Tumoren oder zu einer Verringerung der Zeit bis zum Auftreten von Tumoren, im Vergleich zu gleichzeitigen Kontrollgruppen. Der Prozess der Karzinogenese beinhaltet den Übergang von normalen Zellen in Krebszellen über eine Reihe von Schritten, die sowohl genetische Veränderungen (d. h. Mutationen) als auch nichtgenetische Ereignisse beinhalten können.

Die Internationale Agentur für Krebsforschung (IARC, von englisch International Agency for Research on Cancer) klassifiziert die humankanzerogenen Stoffe je nach Wissensstand bzw. Wahrscheinlichkeit des Auftretens einer Krebserkrankung in verschiedene Kategorien wie in Tabelle 19 dargestellt.

Tabelle 19: Klassifizierung von Stoffen gemäß der Humankanzerogenität nach der IARC.

Kategorie	Bezeichnung	Definition	Prominente und projektrelevante Beispiele betroffener Substanzen	IARC Monograph Vol / Jahr
1	Humankanzerogen = krebserregend im Menschen	Gültig bei ausreichenden Beweisen für die Karzinogenität bei Menschen	Asbest Benzol Holzstaub	62, 100C / 2012
2A	Wahrscheinlich kanzerogen	Mind. zwei der folgenden Indizien treffen zu: • Begrenzte Hinweise auf Karzinogenität beim Menschen • Ausreichende Hinweise auf Karzinogenität bei Versuchstieren • Starke Hinweise, dass der Wirkstoff wesentliche Merkmale von	Alte Mineralwolle	

Kate-gorie	Bezeichnung	Definition	Prominente und projektrelevante Beispiele betroffener Substanzen	IARC Monograph Vol / Jahr
		Karzinogenen aufweist		
2B	Möglicherweise kanzerogen	Eines der Indizien trifft zu: • Begrenzte Hinweise auf Karzinogenität beim Menschen • Ausreichende Hinweise auf Karzinogenität bei Versuchstieren • Starke Hinweise, dass der Wirkstoff wesentliche Merkmale von Karzinogenen aufweist	**RCF-Glasfasern** **E- und 475- Glasfasern** **Carbon Black (Industrieruß**) Multiwall-Carbonnanoröhrchen (MWCNT-7)	43,81 / 2002 81 / 2002 Sup 7, 65, 93 / 2010 111 / 2017
3	Nicht eingestuft	Mangelnde Information für eine Einstufung	CNT außer MWCNT-7 Acrylfasern	111 / 2017 19, Sup 7 / 1987
4	wahrscheinlich nicht karzinogen			

Quelle: Eigene Zusammenstellung, KIT-ITC, nach International Agency for Reserach in Cancer (IARC) (2019).

Basierend darauf finden sich korrespondierende Definitionen in den verschiedenen Regelungen der gesetzgebenden Organisationen wieder, zum Beispiel im Globalen harmonisiertem System zur Einstufung und Kennzeichnung von Chemikalien (GHS, Tabelle 20), die mit dem Anhang 1 der Gefahrstoffverordnung (Bundesregierung (BReg) 26.11.2010) übereinstimmt und auf der aktuell gültigen Europäische Kommission 16.12.2008 basiert.

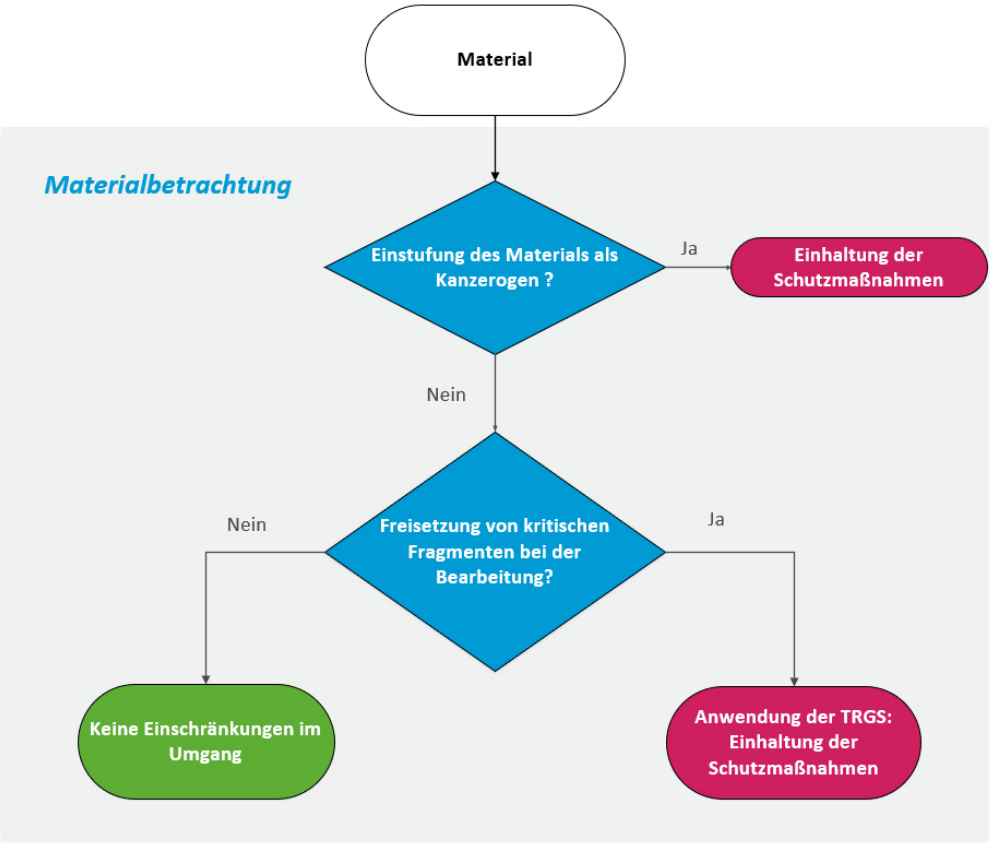
Tabelle 20: Kanzerogenitätskategorien nach dem Globalen harmonisiertem System zur Einstufung und Kennzeichnung von Chemikalien (GHS).

Kategorie	Definition
1	Bekanntermaßen oder wahrscheinlich beim Menschen karzinogen
Kategorie 1A	Bekanntermaßen beim Menschen karzinogen → Einstufung erfolgt durch den Nachweis am Menschen
Kategorie 1B	Wahrscheinlich beim Menschen karzinogen → Einstufung v. a. durch Nachweis am Tier
2	Verdacht auf karzinogene Wirkung beim Menschen, bei nicht ausreichend gesicherter Datenlage

Quelle: Eigene Zusammenstellung, KIT-ITC.

Innerhalb der Materialgruppen, die bei der Demontage und Verwertung von Rotorblättern auftreten, gibt es zum einen Materialien, die als solche bereits einer bestimmten Toxizitäts- oder Kanzerogenitätsklasse zugeordnet sind. Hier ist die Auswahl der einschlägigen Richtlinien und Grenzwerte recht einfach. Sollten die Materialien als solche unkritisch eingeordnet sein, so ist zu prüfen, ob bei der Bearbeitung kritische Stoffe wie inhalierbare Zersetzungsprodukte bei Wärmeeintrag oder inhalierbare Fasern und Partikeln freigesetzt werden, um dann die entsprechenden Regelungen anzuwenden.

Abbildung 84: Auswahl der geeigneten Richtlinien für den Umgang mit Materialien.

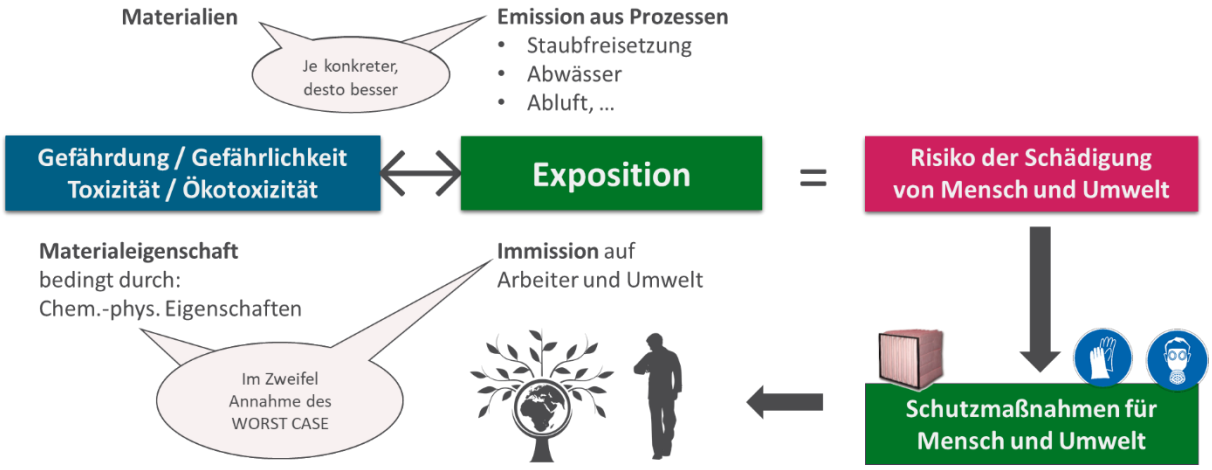


Quelle: Eigene Darstellung, KIT-ITC.

3.3.4 Definitionen Risiko und Risikobewertung

Im Rahmen dieses Projekts soll eine Risikobewertung für Fasern und Stäube, die bei der baustellenseitigen Abfallbehandlung, deren Aufbereitung und Verwertung von Rotorblättern anfallen, durchgeführt werden. Hierbei müssen der Begriff des Risikos sowie der der Risikobewertung genau definiert sein. Im Allgemeinen wird das Risiko als Produkt aus schädigenden Eigenschaften, also einer Gefährdung für Mensch oder Umwelt, und der Exposition, also dem Ausgesetzt sein gegenüber dem gefährdenden Stoff, betrachtet. Dementsprechend bedarf es für die Beurteilung der in diesem Bericht diskutierten Prozesse sowohl der möglichst genauen Materialinformationen mit den zugehörigen Stoffdaten und Eigenschaften, als auch der Freisetzungsszenarien mit konkreten Expositionsangaben zu Konzentrationen an Fasern und Stäuben in der Luft bzw. im Abwasser.

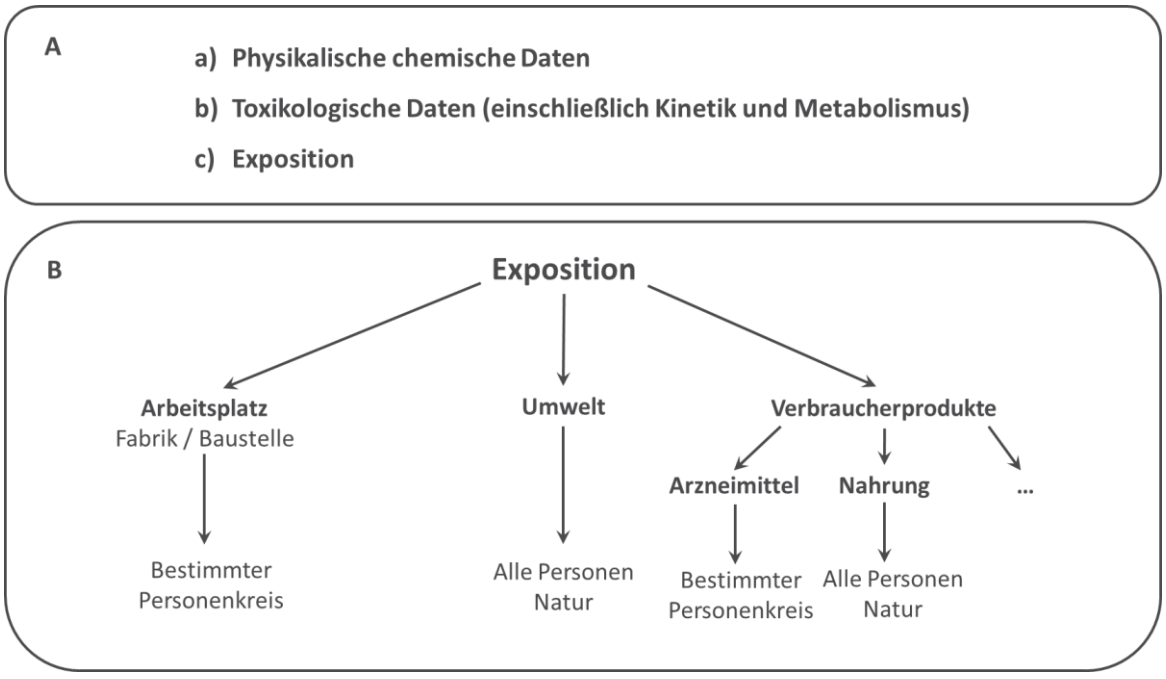
Abbildung 85: Risikobewertung als Produkt aus Gefährlichkeit und Exposition.



Quelle: Eigene Darstellung, KIT-ITC.

Die in Abbildung 86 dargestellte Definition für ein Risiko als Produkt aus Gefährlichkeit und Exposition gilt für alle Bereiche: zum Beispiel für den Umgang am Arbeitsplatz, einen Eintrag in die Umwelt oder die Verwendung in der Lebensmittelindustrie oder anderen Konsumgütern und damit die mögliche Aufnahme über die Nahrung oder Verbraucherprodukte. Dies alles sind mögliche Expositionen gegenüber Stoffen, die erst durch ihr Auftreten in diesen Kompartimenten in Verbindung mit ihrer Gefährlichkeit (also in Abhängigkeit einer Dosis) zum Risiko für die entsprechenden Zielgruppen wie zum Beispiel Arbeitenden, Patienten, oder ganz allgemein Verbraucher bzw. die Allgemeinheit und die Umwelt werden (Abbildung 86).

Abbildung 86: Risikobewertung und Exposition.



A: Kriterien, die in die Risikobewertung einfließen, B: Verschiedene beispielhafte Personenkreise, für die eine Risikobewertung durchgeführt werden kann.

Quelle: Eigene Darstellung, KIT-ITC, nach Vohr (2012).

Für die Ermittlung eines Risikos sind somit beide Bestandteile der Risikogleichung zu ermitteln und, sofern diese Daten vorhanden sind, kann damit eine Risikobewertung durchgeführt werden.

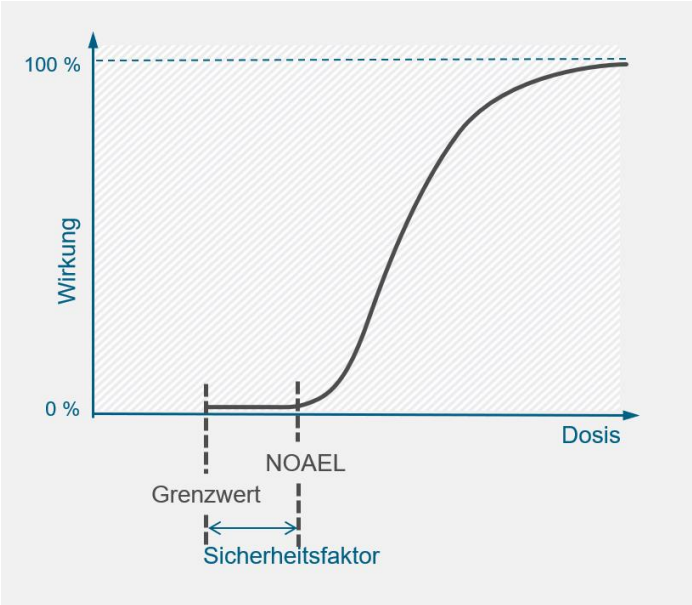
3.3.5 Schutzkonzepte

Abhängig von dem aus einer Risikobewertung erzielten Ergebnis sind zum Schutz von Mensch und Umwelt geeignete Maßnahmen zu ergreifen. Umfang und Art der Maßnahmen hängen dabei unter anderem davon ab, welches Schutzkonzept als Basis für die Entscheidungen herangezogen wird, bzw. werden kann. Es muss zwischen zwei verschiedenen Schutzkonzepten unterschieden werden:

- Das gesundheitsbasierte Konzept
- Das risikobasierte Konzept.

Beim **gesundheitsbasierten Konzept** werden die biologischen Wirkungen des potentiell schädlichen Stoffes angewendet. Dabei kann ein „No Observed Adverse Effect Level“ (NOAEL) ermittelt werden, eine Konzentration bzw. Dosis, bei der noch keine schädigende Wirkung beobachtet wird. Unter Einbeziehung eines Sicherheitsfaktors liefert dieser Wert die Basis für einen Grenzwert.

Abbildung 87: Zusammenhang zwischen Dosis und Wirkung.



Quelle: Eigene Darstellung, KIT-ITC.

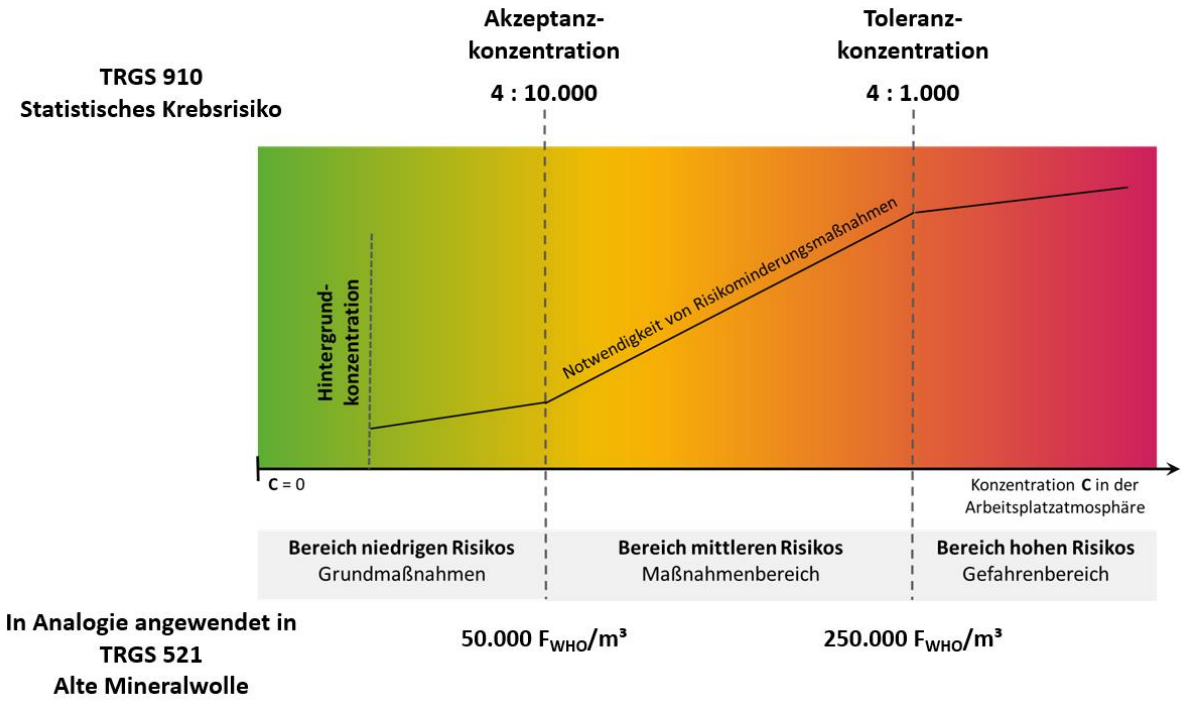
Beim **risikobasierten Konzept** wird kein NOAEL beobachtet oder ermittelt, das heißt, es konnte keine untere Wirkschwelle, unter der definitiv keine nachteilige Wirkung vorliegt, festgestellt werden. Ein typisches Beispiel ist hier die Asbestfaser: Theoretisch kann schon eine einzelne Faser Krebs auslösen. Mangels des konkreten Werts werden anhand der Datenlage, zum Beispiel aus der Epidemiologie, drei Risikobereiche definiert:

- Der Bereich eines niedrigen Risikos: Dieses Risiko ist man bereit, einzugehen, darunter fällt zum Beispiel auch die Hintergrundkonzentration, also die natürlich vorliegende Konzentration in der Umwelt bzw. dem Umfeld des betrachteten Bereichs.

- Der Bereich eines mittleren Risikos: Das Risiko wird als soweit erhöht betrachtet, dass man Maßnahmen zum Schutz ergreift.
- Der Bereich eines hohen Risikos: Dieses Risiko ist so hoch, dass man es als eine Gefahr betrachtet, die man nicht einzugehen bereit ist.

Dieses risikobasierte Konzept findet im Arbeitsschutz Anwendung zur Definition sogenannter Toleranz- und Akzeptanzkonzentrationen (Abbildung 88).

Abbildung 88: Zusammenhang zwischen Risikobereichen und Maßnahmen in der Anwendung zum Arbeitsschutz.



Quelle: Eigene Darstellung, KIT-ITC, nach Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA) 02.04.2014 und Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA) Mai 2002.

Durch das risikobezogene Maßnahmenkonzept nach Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA) 02.04.2014 erfolgt eine Einordnung der durch Arbeitsplatzmessungen oder anderen Ermittlungsmethoden bestimmten Exposition. Anhand der Akzeptanz- und Toleranzkonzentrationen ist eine Einteilung in die folgenden Risikobereiche zur Festlegung der erforderlichen Maßnahmen möglich:

- Bei Einhaltung der Akzeptanzkonzentration: Grüner Bereich.
  - Es sind Grundmaßnahmen umzusetzen und das vorhandene niedrige Risiko wird akzeptiert.
- Bei Überschreitung der Akzeptanzkonzentration und Einhaltung der Toleranzkonzentration: Gelber Bereich.
  - Es existiert ein mittleres Risiko, das nur über einen gewissen Zeitraum toleriert wird, weshalb Maßnahmen durchzuführen sind.
- Überschreitung der Toleranzkonzentration: Roter Bereich.

- Es besteht ein hohes Risiko, bei dem Maßnahmen unverzüglich umgesetzt werden müssen.

Konkret wird dies für Tätigkeiten mit krebserzeugenden Gefahrstoffen in der TRGS 910 festgelegt. Dabei sind die Risikogrenzen stoffübergreifend, während die daraus ermittelten Konzentrationen abgeleitete Größen für die kontinuierliche arbeitstägliche Exposition über die Dauer einer Arbeitslebenszeit von 40 Jahren sind (Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA) 02.04.2014).

- Das Akzeptanzrisiko ist eine stoffübergreifende Größe, die die statistische Wahrscheinlichkeit des Auftretens einer zusätzlichen Krebserkrankung von 4:10.000 angibt. Die für 2018 geplante Verschärfung dieses Wertes auf 4:100.000 ist noch nicht umgesetzt (Informationen des Ausschuss für Gefahrstoffe 2019 (AGS) zur Absenkung der Akzeptanzkonzentration gemäß TRGS 910 im Jahr 2018).
- Die Akzeptanzkonzentration ist die stoffspezifische Konzentration eines Stoffes in der Luft am Arbeitsplatz, die anhand einer kalkulierten Exposition-Risiko-Beziehungen (ERB) dem Akzeptanzrisiko entspricht und bei Unterschreitung mit einem niedrigen, hinnehmbaren Risiko assoziiert wird, das heißt, statistisch betrachtet erkranken bei der Akzeptanzkonzentration vier von 10.000 Personen an Krebs.
- Das Toleranzrisiko ist eine stoffübergreifende Größe, die die statistische Wahrscheinlichkeit des Auftretens einer Krebserkrankung in Höhe von 4:1.000 angibt

Diese Risikogrenzen und -Konzentrationen finden Anwendung bei krebserzeugenden Stoffen, die in der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA) 03.05.2016 genauer spezifiziert sind. Dabei können die lungengängigen Faserfragmente, die beim Umgang mit Carbonfasern und CFK freigesetzt werden, als *„Anorganische Faserstäube (außer Asbest) mit einer Länge > 5 µm, einem Durchmesser < 3 µm und einem Länge-zu-Durchmesser-Verhältnis von > 3:1 (WHO-Fasern)“* verstanden werden.

In der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA) 03.05.2016 sind eine Reihe von Faserarten genannt, für die tierexperimentelle Ergebnisse vorliegen, und die damit konkret eingestuft werden können. Alle anderen anorganischen Typen von WHO-Fasern werden in die Kategorie 2 eingestuft, wenn die vorliegenden Daten (einschließlich Daten zur Biobeständigkeit) für eine Einstufung in die Kategorie 1B nicht ausreichen. Dies gilt unter anderem auch für „nicht erwähnte anorganische Faserstäube“.

3.3.6 Risikoeinschätzung anhand einer Matrix

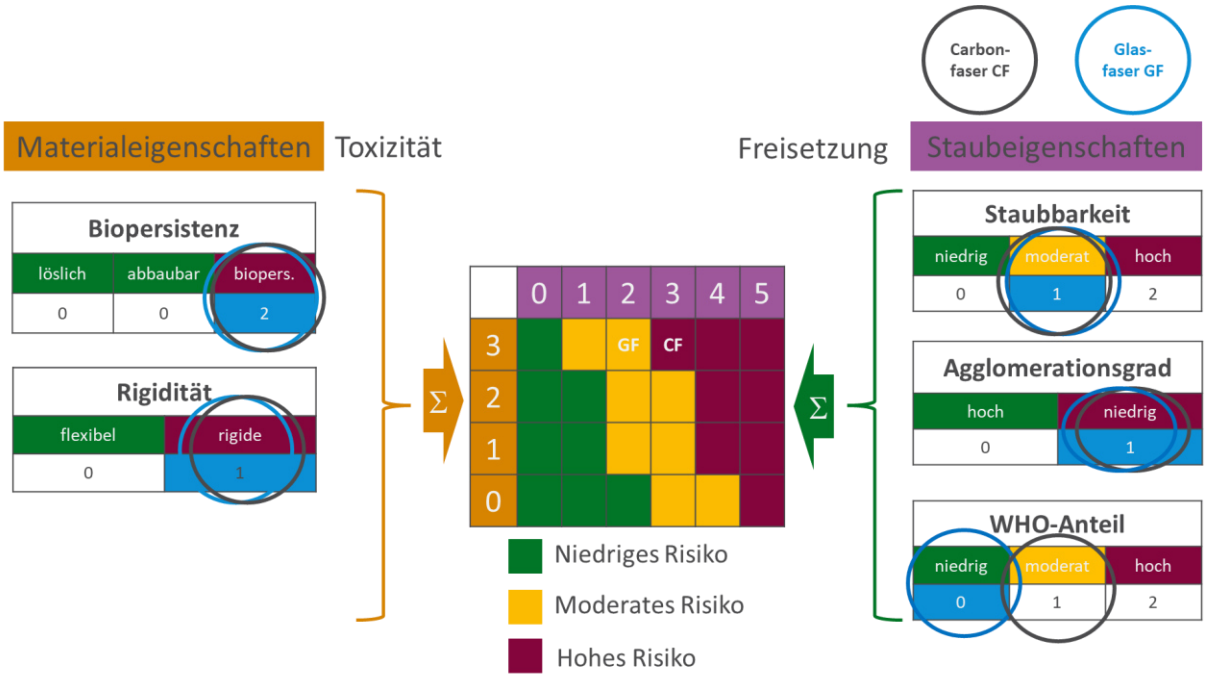
Sollten die konkreten Daten bzgl. der Toxizität und der Exposition nicht zur Verfügung stehen, so kann für eine erste Einordnung des Risikos ein Vergleich mit bekannten Stoffen helfen. Für die Risikogruppierung von Nanoobjekten wurde im Rahmen des Projekts NanoGRAVUR (Asbach et al. 2018) die nachfolgende Matrix entworfen (Abbildung 89). Die wesentlichen Elemente dieser Beurteilung können für eine erste Einschätzung von unterschiedlichen Materialien auch auf die Materialien eines Rotorblatts hinsichtlich des Arbeitsschutzes angewendet werden.

Dabei werden im Prinzip die beiden Parameter der Risikogleichung (Abbildung 89) berücksichtigt. Auf der linken Seite gehen hierbei Materialeigenschaften ein, die insbesondere die Toxizität dieser Materialien berücksichtigen, was besonders die Biopersistenz betrifft, die mit zwei Punkten bewertet wird. Bei lungengängigen Materialien, insbesondere Fasern spielt außerdem die Rigidität eine wichtige Rolle, was sich bei toxikologischen Untersuchungen von CNTs gezeigt hat.

Auf der rechten Seite der Darstellung sind als maßgebliche Parameter für die Expositionsszenarien die Staubeigenschaften und das Freisetzungsverhalten enthalten. Wichtig sind hier Staubbarkeit, Agglomerationsgrad und WHO-Anteil.

Anhand der dabei erzielten Einordnung kann die Anwendung von bestehenden Regularien für konkrete Fälle empfohlen werden. Das Vorgehen wird hier am Beispiel der Carbonfasern und Glasfasern durchgeführt.

Abbildung 89: Matrix zur Risikoermittlung für Stäube am Arbeitsplatz nach NanoGRAVUR.



Quelle: Modifiziert nach Asbach et al. (2018) und Plitzko (2018).

3.4 Materialauswahl und -gruppierung

Die in diesem Kapitel durchzuführenden Betrachtungen sind stark abhängig von Informationen aus den anderen Kapiteln, wie zum Beispiel den Stoffströmen, die in Kapitel 2 bezüglich Menge und Zusammensetzung der Rotorblattabfälle ermittelt werden. Für eine erste Recherche bezüglich des Gefährdungspotentials, das von diesen Materialien ausgehen kann, wird die Materialaufstellung herangezogen, die in Teilen schon im „UBA-Text 117/2019: Entwicklung eines Konzepts und Maßnahmen für einen ressourcensichernden Rückbau von Windenergieanlagen“ (Zotz et al. 2019) enthalten (siehe Tabelle 21).

Tabelle 21: In Rotorblättern von Windenergieanlagen zum Einsatz kommende Materialien.

Materialgruppe	Materialien
Verstärkungsfaser	Glasfaser (meistens E- und ECR-)
	Carbonfaser
Matrix	Epoxidharze
	Polyester (PET)
	Vinylester

Materialgruppe	
	Thermoplaste
Sandwich Part	
	PVC-Schaum
	PET-Schaum
Kleber	Epoxid
Lacke/Coating	UPR
Metalle	Kupfer
	Stahl

Quelle: Eigene Zusammenstellung, KIT-ITC.

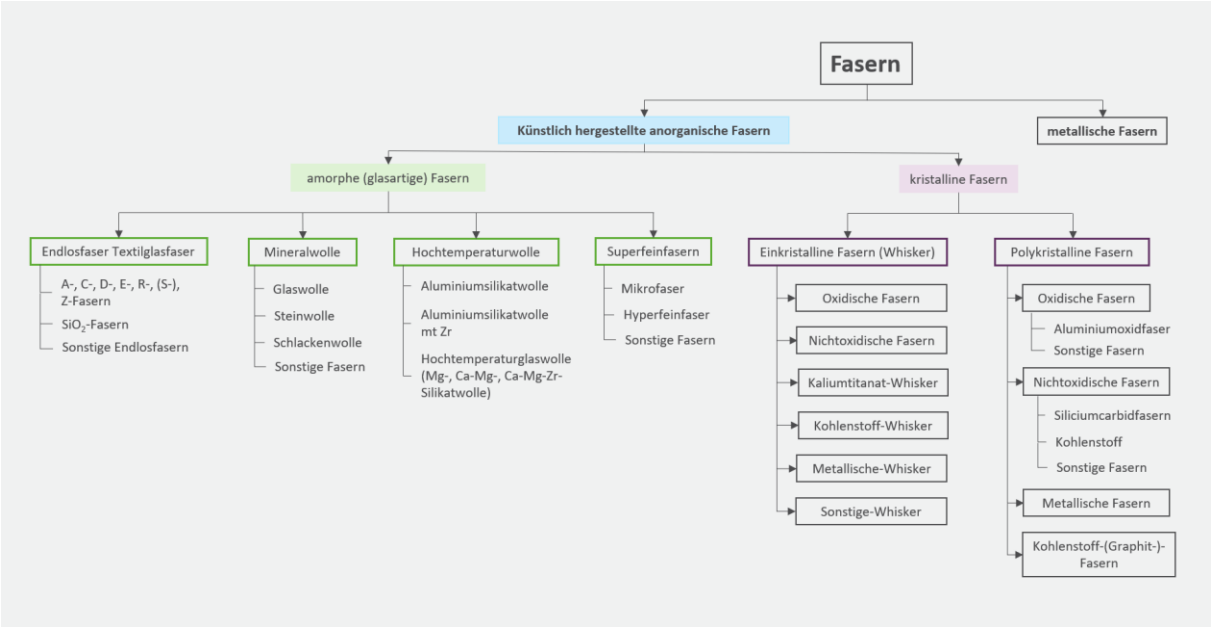
3.5 Ergebnisse

Die gewonnenen Ergebnisse werden in den folgenden Kapiteln dargestellt. Da in diesem Projekt der Fokus auf den verwendeten, in Rotorblättern verbauten Verstärkungsfasern Glasfasern (GF) und Carbonfasern (CF) liegt, werden sowohl für die Fasereigenschaften als auch die Fasertoxizität allgemein, danach für die Materialien spezifische Betrachtungen durchgeführt.

3.5.1 Eigenschaften von Fasern

Bezüglich der Gruppierung von Fasern findet man unterschiedliche Darstellungen, wobei die in Abbildung 90 dargestellte Sortierung anhand der „MAK- und BAT-Werte-Liste 2021“ (Ständige Senatskommission zur Prüfung gesundheitsschädlicher Arbeitsstoffe 2021) erstellt wurde und die beiden wesentlich in diesem Bericht zu berücksichtigenden Fasern, Carbonfaser (CF) und Glasfaser (GF), unter dem Überbegriff anorganische Fasern einsortiert sind. Die IARC sortiert Glasfasern in die künstlichen Fasern (MMVF, man-made vitreous fibres) ein (IARC et al. 2002).

Abbildung 90: Gruppierung von anorganischen Fasern in Abhängigkeit von Material und Form.

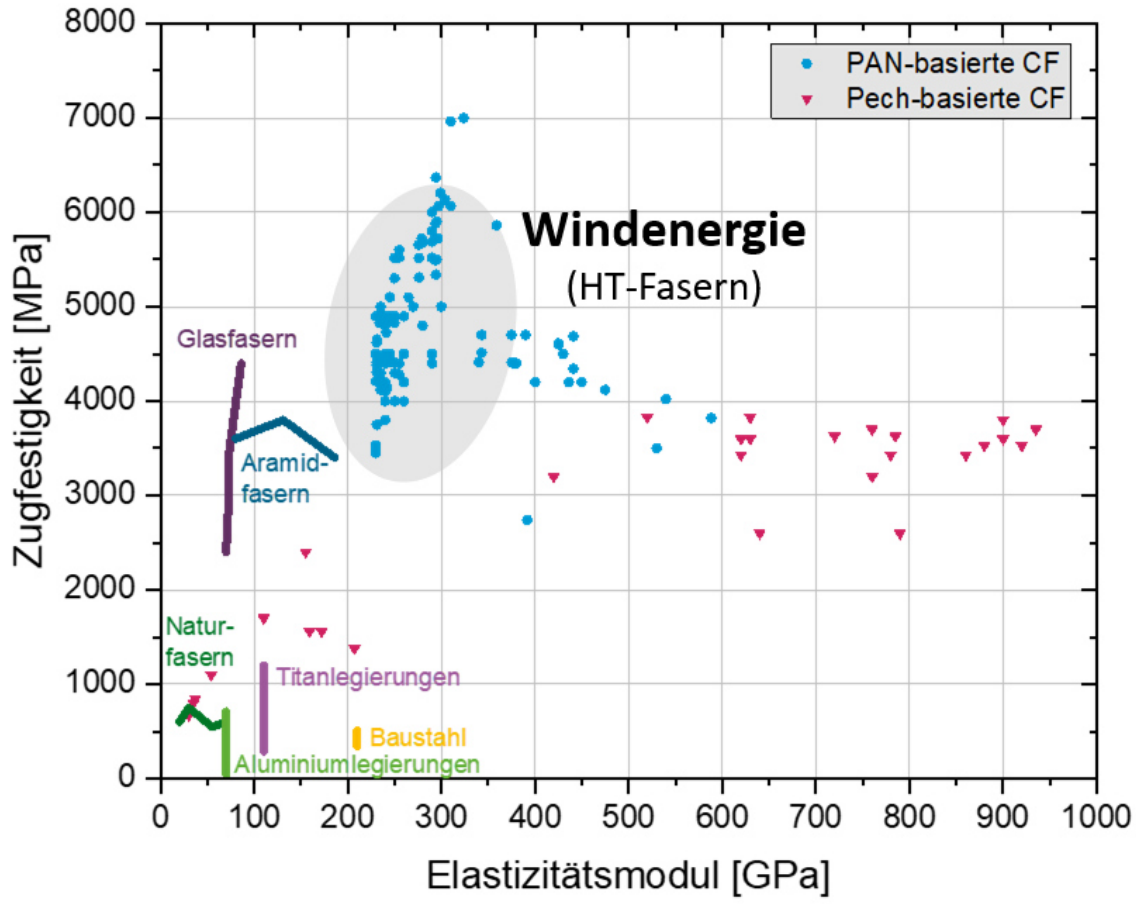


Quelle: Eigene Darstellung, KIT-ITC, nach der Ständige Senatskommission zur Prüfung gesundheitsschädlicher Arbeitsstoffe (2021).

3.5.1.1 Carbonfasern

Allgemein sind knapp 200 unterschiedliche Carbonfasern auf dem Markt verfügbar die, wie in Abbildung 91 dargestellt, über deren charakteristische Werkstoffdaten, Zugfestigkeit und Elastizität, gruppiert werden können. Über das Ausgangsmaterial und den Herstellungsprozess lassen sich sehr unterschiedliche Materialeigenschaften für die Carbonfasern einstellen, sodass verschiedene Fasertypen erhältlich sind, wobei insbesondere Polyacrylnitril (PAN) -basierte CF die höchste Zugfestigkeit besitzen und die Gruppe der hochfesten Carbonfasern (HT = high tenacity) repräsentieren. Pech-basierte CF bestimmen hingegen den UM-Bereich (ultra modulus). Nach eigenen Recherchen sind in Rotorblättern maßgeblich Carbonfasern vom Typ HT verbaut, die, wie in der Abbildung 91 dargestellt, PAN-basiert sind. Diese Einschätzung kann durch Recherchen und Gespräche innerhalb des Netzwerks Composites United e. V. bestätigt werden, wobei genauere Angaben zu den Fasertypen, die in Rotorblättern verbaut sind, wünschenswert wären.

Abbildung 91: Darstellung marktüblicher Carbonfasern in Abhängigkeit ihrer Eigenschaften.

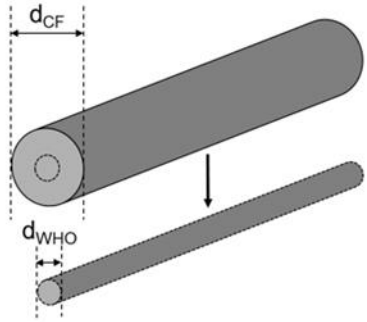


Aufgetragen sind die Zugfestigkeiten in MPa über dem Elastizitätsmodul in GPa. Die Farben der Punkte geben den Precursor an, wobei PAN-basierte und Pech-basierte Fasern dominieren. Der Bereich der in der Windenergie vorherrschenden HT-Fasern ist grau hinterlegt.

Quelle: Eigene Darstellung, KIT-ITC, nach Wexler et al. (2020).

Im Allgemeinen besitzen Carbonfasern einen Durchmesser ≥ 4 µm, wobei der maximale Faserdurchmesser bei etwa 11 µm liegt. Viele gängige Carbonfasern vom Typ HT liegen im Faserdurchmesser bei etwa 7 µm und sind in ihrer Ursprungsform somit nicht alveolengängig. Lungengängige Fasern oder Faserfragmente können insbesondere durch eine thermische Belastung entstehen, die eine oberflächliche Oxidation bewirkt, die wie in der Abbildung für PAN-basierte CF zum Beispiel zu einem porenartigen Angriff führen kann, wobei auch der Faserdurchmesser abnimmt (Abbildung 92). Bei thermischer Belastung Pech-basierter CFs wird mittels bildgebender Analysen öfter die Ausbildung von Spitzen beobachtet. Bei nicht gekühlten Schneidvorgängen kann eine kombinierte mechanisch / thermische Belastung nicht ausgeschlossen werden, sodass über unterschiedliche Mechanismen lungengängige Carbonfaserfragmente entstehen können (Bäger et al. 2019; Kehren et al. 2019; Walter et al. 2016).

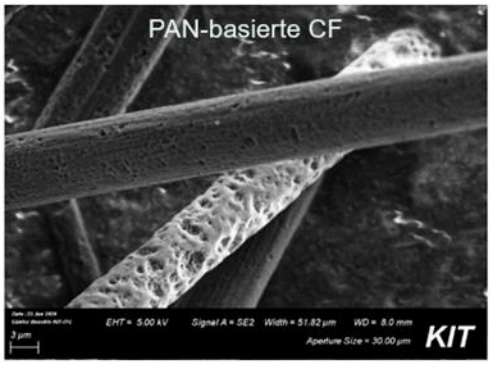
Abbildung 92: Thermischer Abbau von Carbonfasern.

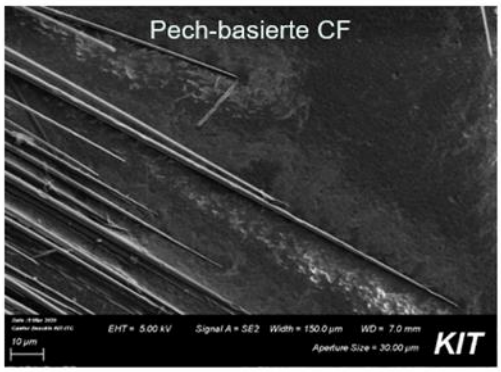


d_{CF} Durchmesser CF

d_{WHO} max. WHO-Durchmesser (3 µm)

d_{CF} [µm]	Δm ($d_{CF} \rightarrow d_{WHO}$) [%]
4,4	54
7	82
11	93





Darstellung zur möglichen Entstehung von Carbonfaserfragmenten, die die WHO-Kriterien erfüllen. Links: Darstellung des damit verbundenen Masseverlusts in Abhängigkeit vom Ausgangsdurchmesser der Faser. Rechts: Repräsentative Rasterelektronenmikroskopieaufnahmen von je einer PAN- und Pech-basierten Carbonfaserart.

Quelle: Eigene Darstellung, KIT-ITC.

3.5.2 Stand der Richtlinien für Fasern an Arbeitsplätzen

Aktuell gibt es für CF keinen stoffspezifischen Grenzwert. Daher werden je nach Betrachtungsweise unterschiedliche Richtlinien herangezogen, zum Beispiel werden Carbonfasern, die per Definition aus mehr als 90 % Kohlenstoff bestehen, wie Kohlestaub oder Graphit betrachtet.

Prinzipiell gilt bei der Einordnung die Unterscheidung, ob das „in Verkehr bringen" eines Stoffes oder die „Exposition am Arbeitsplatz" betrachtet wird. Im ersteren Fall kommen die Einordnungen und Regelungen aus REACH zum Tragen, im Arbeitsschutz muss die mögliche Exposition gegenüber kritischen Substanzen betrachtet werden. Im Fall der Fasern heißt das, dass eine eventuelle Freisetzung von Fasern mit WHO-Geometrie betrachtet und die dafür relevanten TRGS heranzuziehen sind.

Demgegenüber steht das übliche Vorgehen der Hersteller, die in ihren Sicherheitsdatenblättern nur auf das Produkt schauen und die Bearbeitung durch nachfolgende Gewerke oder die Nutzung durch einen Verwender außen vorlassen. Nachfolgend sind für die Begrenzung und Überwachung der Exposition / persönliche Schutzausrüstungen Auszüge aus den Sicherheitsdatenblättern zweier weit verbreiteter CF dargestellt. Im ersten Auszug wird als 15 min. Kurzzeitwert (Kzw) eine Konzentration von 10 mg/m^3 angegeben und für den Tagesmittelwert (Tmw) eine Konzentration von 5 mg/m^3, wobei diese Werte für Graphit (Alveolarstaub mit < 1 % Quarz) genannt werden (Tabelle 22).

Tabelle 22: Auszug aus dem Sicherheitsdatenblatt für Sigrafil-Carbonfasern, Abschnitt 8, Ausgabe von 2018.

Zusätzliche Hinweise zu Grenzwerten: Wenn technische Absaug- und Lüftungsmaßnahmen nicht möglich oder unzureichend sind, muss Atemschutz getragen werden. DMEL/DNEL (Inhalation): 10 mg/m³

Cas-Nr.	Bezeichnung	mg/m³	Kategorie	Herkunft
744-44-0	Graphit (Alveolarstaub mit < 1 % Quarz)	5 A-Staub 10 A-Staub	Tmw (8 h) Kzw (15 min)	MAK MAK

Quelle: Eigene Darstellung, KIT-ITC, vom Hersteller angegebener Werte nach Sicherheitsdatenblatt SIGRAFIL® Fibers (alle Typen), SGL TECHNOLOGIES GmbH.

Im zweiten Beispiel (Tabelle 23) wird der allgemeine Staubgrenzwert (ASGW) für A- und E-Staub nach TRGS 900 genannt, wobei auch die Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA) Februar 2008 als Quelle angeführt wird, die bezüglich des ASGW jedoch nicht die richtig Quelle ist. Für Carbonfasern wird nach GESTIS Limit Values (Belgien VLEP/GWBB) eine Faserkonzentration von 2 Fasern/cm³ angegeben und nach GESTIS Limit Values (China) eine Massenkonzentration von 3 mg/m³.

Tabelle 23: Auszug aus dem Sicherheitsdatenblatt für Tenax-Carbonfasern, Abschnitt 8, Ausgabe von 2021.

Arbeitsplatzgrenzwerte AGE (OEL)	8 Stunden	15 min	Quelle
Allgemeiner Staubgrenzwert		1,25 A mg/m³ [2)] 10 E mg/m³ [2)]	TRGS 900, 521 GESTIS Limit Values Germany (AGS)
Carbonfasern	2 fibres particles/cm³		GESTIS Limit Values Belgien VLEP/GWBB China
	3 E mg/m³ [1)]		GESTIS Limit Values Belgien VLEP/GWBB China

[1)] Inhalable aerosol and vapor

[2)] 15 minutes reference period/ exceedance factor 2

Quelle: Eigene Darstellung, KIT-ITC, vom Hersteller angegebener Werte nach Sicherheitsdatenblättern für Tenax® geschnittene Kohlenstofffasern, Tenax® gemahlene Kohlenstofffasern und Tenax® Kohlenstofffilamentgarne mit Ausnahme der Nickel-beschichteten Typen, (Teijin Carbon Europe GmbH).

Carbonfasern sind im Allgemeinen als Endlosmaterial von der Rolle oder als Halbzeuge in unterschiedlichen Ausführungen erhältlich. Sofern sie als Endlosmaterial über die chemische Zusammensetzung eingeordnet werden, kann man sie als Kohlenstoff betrachten. Wenn sie aber als Mahlgut bzw. Pulver vorliegen, sollte eine differenziertere Betrachtung erfolgen. In den hier gezeigten Beispielen werden die Sicherheitsdatenblätter aber einheitlich auf alle Formen angewendet. Besonders problematisch stellt sich dabei dar, dass die herangezogenen Grenzwerte teilweise nicht immer aktuell sind.

Will man für die hier betrachteten Carbonfasern einen Zusammenhang zwischen Massen- und Faserkonzentration herstellen, so werden die Materialdichte und die Faserabmessung benötigt. Die PAN-basierten Fasern besitzen eine Dichte von 1,8 g/cm³ und damit ergibt sich für lungen-

gängige Fasern mit D = 3 µm und L = 75 µm der Zusammenhang, dass 1 F/cm³ etwa 1 mg/m³ entspricht. Hierbei ist zu beachten, dass die Faseranzahlkonzentration sich auf cm³ und die Massenkonzentration auf m³ bezieht. Daraus folgt, dass die angegebenen Werte von 3 mg/m³ für China einem wesentlich höheren Grenzwert entspricht. Der für GESTIS Limit Values (Belgien VLEP/GWBB) angegebene Wert von 2 Fasern/cm³ bezieht sich auf die originale Carbonfaser, wobei deren Durchmesser im SDB mit d > 5 µm angegeben ist.

Aktuell werden lungengängige Carbonfaser-Fragmente von verschiedenen Einrichtungen unterschiedlichen Richtlinien bzw. Grenzwerten zugeordnet. Die Unfallversicherungsträger ordnen diese aktuell der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA) Februar 2008 zu, die allgemein den Umgang mit sogenannter alter Mineralwolle regelt. Die BAuA schlägt aktuell entsprechend des Zwischenstands des Projekts CarboBreak eine Zuordnung zur Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA) Januar 2006 vor, wo Maßnahmen in Abhängigkeit der Akzeptanz- und Toleranzkonzentration analog zu Asbest- und Aluminiumsilikatfasern erfolgen sollen.

Zieht man die Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA) 03.05.2016 heran, sollten CF-Fragmente, die die WHO-Kriterien erfüllen, als krebserregender Stoff der Kategorie 2 (siehe Tabelle 20) eingestuft werden und damit wie alte Mineralwolle.

Eine gute Zusammenfassung der oben dargestellten Situation ist wie folgt als Zwischenstand im Rahmen des CarboBreak-Projekts formuliert:

- Derzeit gibt es **keinen Grenzwert** für CF-Bruchstücke an Arbeitsplätzen oder in der Umwelt.
- Da CF **biobeständig und rigide** sind, besteht der Verdacht auf asbestartige Wirkung durch die Ähnlichkeit in materialphysikalischen Eigenschaften.
- Auch die **Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA) 03.05.2016** nimmt diese Verdachtseinstufung aller **anorganischen WHO-Fasern** vor und ordnet diese Fasern in Kategorie 2 der krebserzeugenden Stoffe ein.
- Die Unfallversicherungsträger orientieren sich mangels einschlägiger Richtlinien an der **Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA) Februar 2008 für Mineralwolle** (Expositionskategorien nach Expositionshöhe). Folgt man dieser Empfehlung, bedeutet dies für die **Akzeptanzkonzentration 50.000 F_{WHO}/m^3** und für die **Toleranzkonzentration 250.000 F_{WHO}/m^3,** setzt aber voraus, dass inhalierbare CF-Fragmente sich gesundheitlich ähnlich der Mineralwolle verhalten. Darüber hinaus hat dies nur eine empfehlende, aber keine rechtlich bindende Wirkung.

Für alveolengängige Fasern ist die teils kritische Diskussion von Carbonfasern mit dem Asbest-Dilemma begründet, da es bis heute, noch Jahrzehnte nach dem Verbot der Verwendung von Asbest, allein in Deutschland jährlich mehr als 1.500 anerkannte berufsbedingte Todesopfer gibt (BAuA 2015). Aus diesem Grund gibt es intensive Anstrengungen, dass sich mit einem neuen innovativen Material ein solcher Fall nicht wiederholt.

Tabelle 24: Definitionen, Werte und Geltungsbereiche verschiedener TRGS.

Richtlinie	Definitionen	Grenzwert	Geltungsbereich
Bundesanstalt für Arbeitsschutz und	Allgemeine Staubgrenzwert (ASGW) Einatembar (E-Staub) Alveolengängig (A-Staub)	 10 mg/m³ 1,25 mg/m³ (Für ρ = 2,5 g/cm³)	Arbeitsplatzgrenzwert für schwerlösliche bzw. unlösliche Stäube, die

Richtlinie	Definitionen	Grenzwert	Geltungsbereich
Arbeitsmedizin (BAuA) Januar 2006 (27.10.2020)			nicht anderweitig reguliert sind z. B. für Graphit, Kohlestaub, Kunststoffstaub
Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA) Februar 2008 (Feb. 2008)	Expositionskategorie 1 Expositionskategorie 2 Expositionskategorie 3	< 50.000 F/m³ 50.000 – 250.000 F/m³ > 250.000 F/m³	Umgang mit alter Mineralwolle bei Arbeiten mit alter Mineralwolle (siehe 3.3), bei denen als krebserzeugend eingestufte Faserstäube freigesetzt werden. Faserstäube im Sinne dieser TRGS sind Stäube, die künstliche anorganische Mineralfasern mit einer Länge größer 5 µm, einem Durchmesser kleiner 3 µm und einem Länge-zu-Durchmesser-Verhältnis, das größer als 3 zu 1 (WHO-Fasern) ist, enthalten, und damit als alveolengängig angesehen werden.
Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA) 02.04.2014 (29.03.2019)	Expositionskategorie 1 Expositionskategorie 2 Expositionskategorie 3		krebserzeugende Stoffe der Kategorie 1A oder 1B nach Classification, Labelling and Packaging (CLP)-Verordnung sowie nach TRGS 905
Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA) 03.05.2016 (13.3.2020)	Expositionskategorie 1 Expositionskategorie 2 Expositionskategorie 3		Anorganische Faserstäube der Kategorie „WHO-Fasern“ werden in die Kategorie 2 eingestuft

Quelle: Eigene Zusammenstellung, KIT-ITC.

Wie in den vorangegangenen Kapiteln gezeigt, fehlen neben den Grenzwerten auch Daten zum Verhalten der Fasern in den verschiedenen Prozessen verschiedener Arbeitsplätze. Bezüglich der Bildung von Faserstäuben (WHO-Anteil) gibt es erste Studien, die die Bildung und Freisetzung solcher Faserfragmente aufzeigen; es besteht aber nach wie vor Forschungsbedarf (Schlagenhauf et al. 2015; Kehren et al. 2019; Bäger et al. 2019). Dieser wird aktuell insbesondere in den beiden laufenden NanoCare-Projekten Carbon Fibre Cycle (CFC -

Carbonfasern im Kreislauf – Freisetzungsverhalten und Toxizität bei thermischer und mechanischer Behandlung) sowie im Projekt CarboBreak bearbeitet. Weiterhin wurden im gerade abgeschlossenen UFOPlan-Projekt “Möglichkeiten und Grenzen der Entsorgung carbonfaserverstärkter Kunststoffabfälle in thermischen Prozessen“ (Quicker et al. 2021) Untersuchungen zur Bildung lungengängiger Faserstäube durchgeführt. Im Projekt CarboBreak wurden erste Untersuchungen zur mechanischen CFK-Bearbeitung (z. B. Sägen) und Zerkleinerung (Laborkugelmühle, industrieller Shredder) durchgeführt. Auch im Projekt Carbon Fibre Cycle wurden solche Untersuchungen vom Institut für Verbundwerkstoffe (IVW) (mechanische CFK-Bearbeitung) und dem ITC (Kugelmühle) durchgeführt (Publikationen in Vorbereitung).

Die Unfallversicherungsträger betreiben das Messsystem Gefährdungsermittlung (MGU), (IFA 2013), dieses hat 2004 ein Messprogramm zur Erfassung der Konzentration splitterförmiger Fasern bei Herstellung und Bearbeitung von carbonfaser- und glasfaserverstärkten Verbundwerkstoffen aufgelegt. Die ermittelten Daten finden Eingang in die vom Institut für Arbeitsschutz (IFA) betreute IFA-Expositionsdatenbank "Messdaten zur Exposition gegenüber Gefahrstoffen am Arbeitsplatz – MEGA“. Diese Datenbank wird für Gefahrstoffe seit 1972 geführt und enthält die im UVT–MGU ermittelten Expositionsdaten zu Luftmessungen und zu Materialproben mit Angaben, z. B.

- zum betrieblichen Arbeitsbereich
- zu den Arbeits- und Produktionsverfahren
- zu den Einsatzstoffen
- zu den Schutzmaßnahmen
- zur Expositionssituation
- zu den Bedingungen der Probenahme und der Analytik.

Die in MEGA vorliegenden Daten dienen den im MGU mitwirkenden Unfallversicherungsträgern als Datenbasis für die Prävention, für die Epidemiologie sowie für die rückwirkende Analysen im Rahmen der Ermittlungen im Zusammenhang mit angezeigten stoffbedingten Berufskrankheiten.

Seit 1994 werden hier Expositionsdaten bei der Bearbeitung von GFK und CFK erfasst. Laut IFA erfolgt die Entstehung und Freisetzung von Carbonfasersplittern in gleicher Weise wie faserförmige Splitter aus Textilglasfasern (GFK) und die Anwendungsgebiete und Bearbeitungsverfahren sind vergleichbar. Aus diesem Grund wurden die Daten beider Werkstoffe bis 2011 zusammenfassend in der Datenbank erfasst. Die Auswertung aller auf CFK- und GFK-Anwendungen zurückführbaren Expositionsdaten aus der Zeit von 1994 bis 2001 und eine Gegenübergestellung zu den Daten von 2002 bis 2011 wurde 2019 durch Mattenklott und Gelder (2019) in „Carbonfasern und carbonfaserverstärkte Kunststoffe (CFK), Teil 1: Charakterisierung, Exposition, Bewertung und Schutzmaßnahmen“ veröffentlicht, wo diese Thematik detailliert aufbereitet wird und bisher vorliegende Expositionsdaten bei der industriellen Anwendung von CF und CFK und etablierte Schutzmaßnahmenkonzepte vorgestellt werden. Angekündigt wird in dem Paper ein zweiter Teil, in dem detaillierter auf den Stand der Technik bei Schutzmaßnahmen und die in den letzten Jahren erhobenen Expositionsdaten bei der Herstellung und Bearbeitung von CFK und GFK eingegangen werden soll.

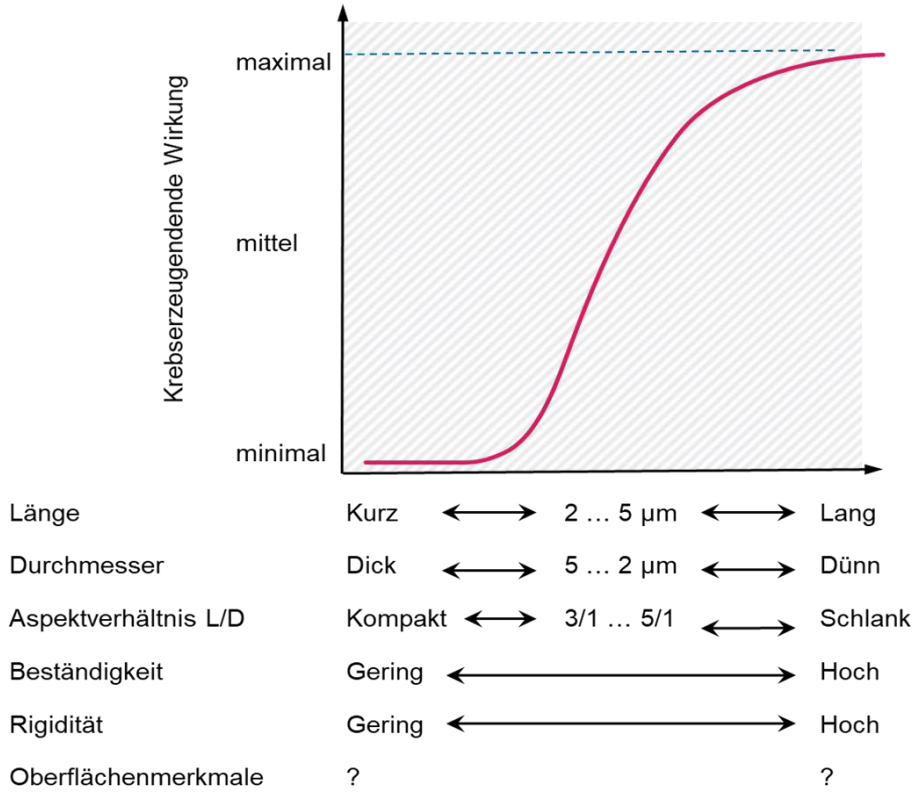
In dieser Veröffentlichung von Mattenklott wird angegeben, dass die gemessenen Expositionen unter 50.000 Fasern/m^3 liegen, wobei für die betrachteten Tätigkeiten der Median der Exposition (50-%-Wert) zwischen rund 10.000 und 20.000 F/m^3 und der 90-%-Wert für viele Tätigkeiten unter 100.000 F/m^3 liegt. Unter bestimmten Umständen und Bearbeitungssituationen können aber auch sehr hohe Expositionen von deutlich mehr als 250.000 F/m^3 auftreten.

Die DGUV hat 2014 eine Orientierungshilfe für Schutzmaßnahmen bei der Bearbeitung von CFK-Materialien herausgegeben (Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (DGUV) 2014). Wie oben beschrieben, werden auch hier die Faserstaubgrenzen der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA) Februar 2008 herangezogen, wobei alternativ auch der Allgemeine Staubgrenzwert ASG nach Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA) Januar 2006 bestimmt werden kann, der dann aber mit einem Faktor abgesenkt ist. In den Expositionskategorien 1 und 2 wird 1/10 des ASG angegeben, in der Expositionskategorie 3 gilt ASG.

3.5.3 Biologische Wirkung von Fasern

Für kanzerogene Fasern spielen neben dem WHO-Kriterium die Rigidität und Biopersistenz eine wichtige Rolle. Die Zusammenhänge sind in Greim (Greim 2017) nach Pott und Heinrich zusammengefasst. Pott hat im Rahmen der Asbestproblematik die Grundlagen zum Verständnis der Fasertoxikologie gelegt (Pott 1994; Pott und Roller 2003). Wie im Fall der Nanopartikel, bei dem die Diskussion um den entscheidenden Dosisparameter (Anzahl, Masse oder reaktive Oberfläche) noch nicht abgeschlossen ist, ist auch bei den Fasern der Einfluss der Oberfläche auf die Toxizität noch ungeklärt (Abbildung 93).

Abbildung 93: Abhängigkeit der Stärke der kanzerogenen Wirkung von Länge, Durchmesser, Gestalt und Beständigkeit der Fasern.

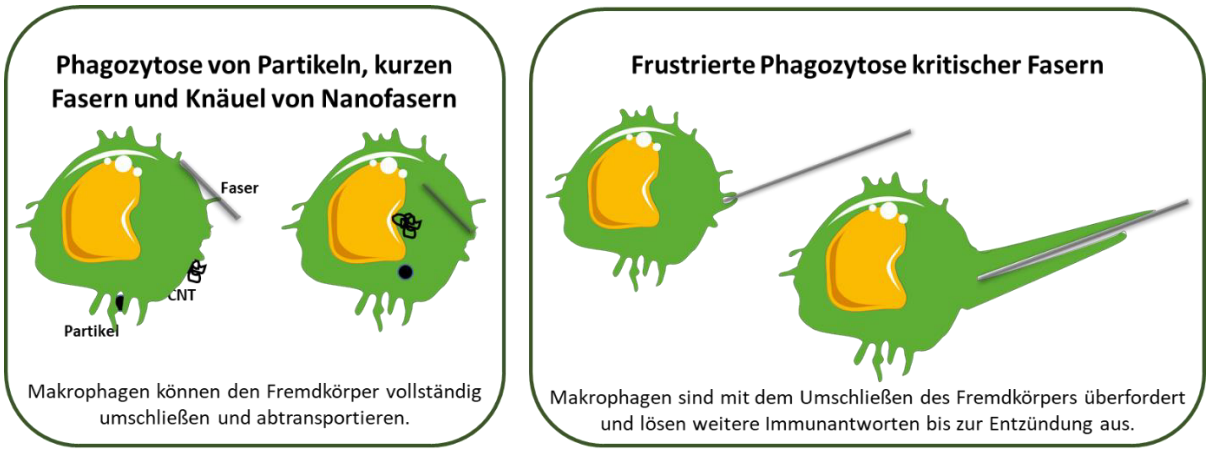


Quelle: Eigene Darstellung, KIT-ITC, modifiziert nach Greim (2017).

Abbildung 93 verdeutlicht außerdem, dass das WHO-Kriterium eine Mindestlänge für kritische Fasern definiert. Fasern mit einer Länge unter 5 µm verursachen im Allgemeinen keine frustrierte Phagozytose, einen typischen Mechanismus der Fasertoxikologie. Die Phagozytose ist ein natürlicher Mechanismus des Immunsystems, bei dem Makrophagen, die Fresszellen des humanen Immunsystems, partikuläre Fremdstoffe kontaktieren und nach und nach umschließen. Dies können sie mit mehreren Fremdkörpern durchführen, bis sie einen Füllgrad erreicht haben und dann über die Abreinigungsmechanismen aus dem Körper ausgeführt werden. Bei der frustrierten Phagozytose werden die Makrophagen mit den Fremdkörpern überfordert und können sich nicht um weitere Fremdkörper kümmern. Stattdessen senden sie Botenstoffe aus, die weitere Makrophagen hinzurufen und damit die Fokussierung des Immunsystems auf diesen einen Fremdkörper noch forcieren. Dies führt dann im weiteren Verlauf zu Entzündungsprozessen und ggfs. zur Krebsbildung.

Dieser Mechanismus tritt umso wahrscheinlicher ein, je steifer die Faser ist; demgegenüber können viele Kohlenstoffnanoröhrchen (Carbon Nanotubes, CNT) knäulen und damit doch ganz durch die Makrophagen aufgenommen werden. Dies schließt viele Publikationen zu CNT für die Beurteilung von Carbonfasern aus.

Abbildung 94: Mechanismen der Phagozytose und frustrierten Phagozytose an Fremdkörpern unterschiedlicher Geometrie.



Quelle: Eigene Darstellung, KIT-ITC.

Nach Greim (2017) sind die drei häufigsten Krankheitsbilder nach Faserinhalation die

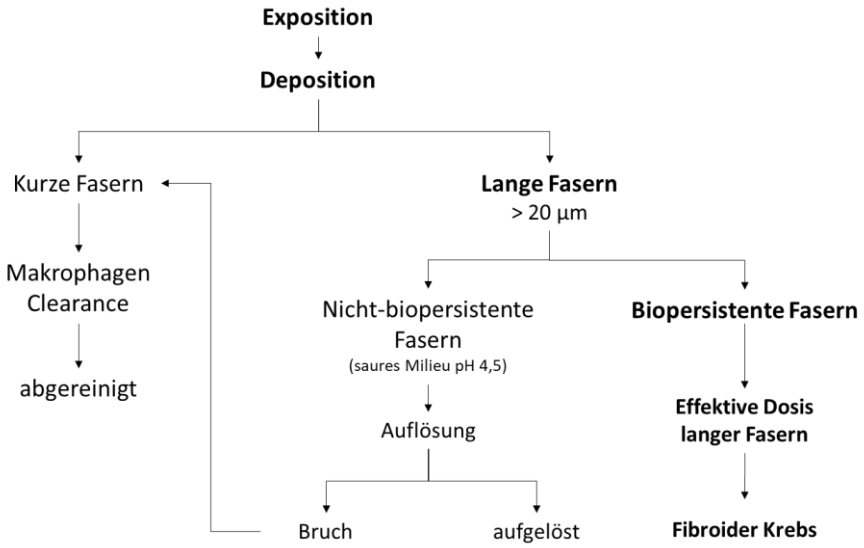
- **Asbestose**
  Die Asbestose ist eine langsam fortschreitende chronische Fibrose. Bei einer Fibrose handelt es sich um eine krankhafte Vermehrung des Bindegewebes in Geweben und Organen, dessen Hauptbestandteil Kollagenfasern sind. Dabei erhöhen sich die Zahlen der Fibroblasten und der Kollagenfasern, die von diesen gebildet werden. Dadurch verhärtet sich das Gewebe des betroffenen Organs. Die Fibroblasten sezernieren Zytokine, die wiederum bewirken, dass die Verletzung repariert wird. Es entstehen narbige Veränderungen, die im weiteren Verlauf zur Einschränkung der Organfunktion führen. Stoffe, die eine Fibrose auslösen, nennt man Fibrinogene. Einer Fibrose geht meist eine langanhaltende Entzündung voraus. Im Falle der Reaktion des Lungengewebes auf die aufgenommenen Asbestfasern wird die Lungenfunktion eingeschränkt. Die Schwere der Erkrankung hängt von der Expositionsdosis (Konzentration und Expositionsdauer) gegenüber Asbest ab. Bereits seit 1936 ist die Asbestose als Berufskrankheit anerkannt.

- **Lungenkrebs**
  Der Lungenkrebs tritt häufig in Verbindung mit Asbestose auf, und dabei erheblich häufiger bei asbestexponierten Rauchern als bei asbestexponierten Nichtrauchern. Damit handelt es sich um ein klassisches Beispiel für synergistische Wirkungen von Schadstoffen.

- **Mesotheliome**
  Mesotheliome sind maligne Tumore in Brustfell (Pleura) und Bauchfell (Peritoneums). Sie sind eine seltene Krebsart. In den USA stellen sie weniger als 0,04 % aller Todesfälle und gelten als Hinweis auf Asbestbelastung.

Donaldson (2009) hat eine Reihe von Studien zu p-Aramid-Fasern ausgewertet, diese sind zum Teil im Vergleich zu Chrysotil, einem der häufigsten Asbeste, und zu Glasfasern betrachtet worden. Ein Schwerpunkt wurde dabei auf die Verweilzeit der Fasern in der Lunge gelegt, da eine mögliche bzw. schnellere Clearance (Reinigung durch Aufnahme und/oder Abtransport) das Krebsrisiko reduziert. Weisen die Fasern eine gewisse Löslichkeit auf, können sie nach teilweiser Auflösung auch in kurze Fasern übergehen, bei denen dann die Clearance-Funktionen des Immunsystems wirken können (Abbildung 95).

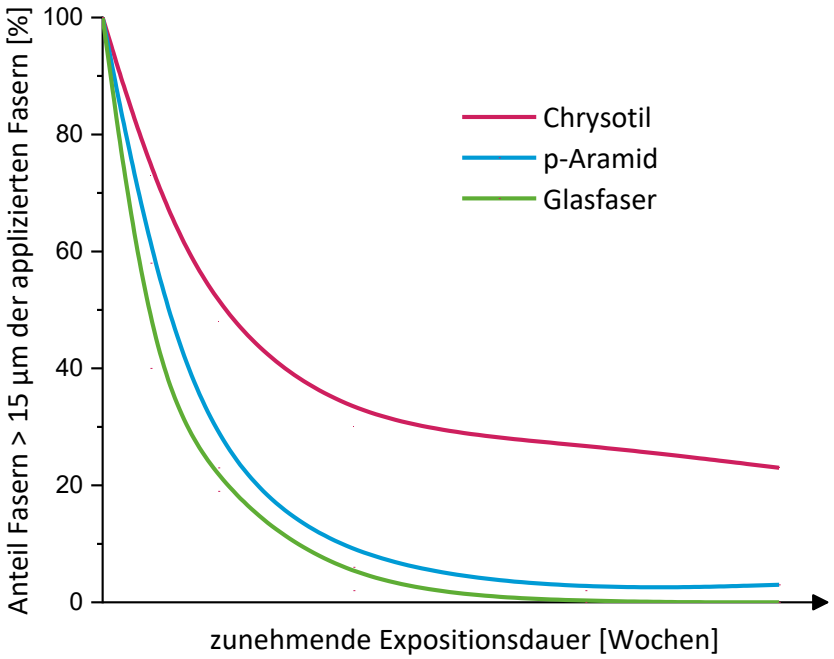
Abbildung 95: Übergreifendes Modell für die Rolle von Länge, Biopersistenz und Clearance im Faserpathogenitätsparadigma.



Quelle: Eigene Darstellung, KIT-ITC, übersetzt nach Donaldson (2009).

Dabei zeigt ein Vergleich der drei Materialien, wie der Anteil an Fasern mit einer Länge über 15 µm in Rattenlungen in den Wochen nach der Inhalation der Fasern abnimmt. Am Ende des Zeitraums sind vom Asbest noch mehr als 20 % vorhanden, während P-Aramid und die Glasfasern schon in der ersten Woche ungefähr auf die Hälfte reduziert und im letzten Drittel des Zeitraums nahezu vollständig abgebaut werden (Abbildung 96).

Abbildung 96: Qualitative Darstellung der postexpositionszeitabhängigen Abnahme des Anteils langer (>15 µm) Fasern in der Rattenlunge nach Inhalationsexposition mit p-Aramid-Fibrillen, Chrysotilasbest oder C100/475-Glasfasern.



Quelle: Eigene Darstellung, KIT-ITC, nach Donaldson (2009).

Diese und ähnlich Studien führten in der EU-Richtlinie für die Einstufung, Verpackung und Kennzeichnung gefährlicher Stoffe (Europäische Kommission 05.12.1997) dazu, dass die Einstufung als krebserzeugend nicht zwingend greift, wenn in einem der folgenden Tests nachgewiesen wird, dass der Stoff die jeweilige Voraussetzung erfüllt:

- Nachweis, dass in einem kurzfristigen Inhalationsbiopersistenztest die gewichtete Halbwertszeit der Fasern mit einer Länge von über 20 µm weniger als 10 Tage beträgt.
- Nachweis, dass in einem kurzfristigen Intratrachealbiopersistenztest die gewichtete Halbwertszeit der Fasern mit einer Länge von über 20 µm weniger als 40 Tage beträgt.
- Nachweis, dass ein geeigneter Intraperitonealtest keine Anzeichen von übermäßiger Karzinogenität aufweist.
- Nachweis bei einem geeigneten Langzeitinhalationstest, dass keine relevante Pathogenität oder neoplastischen Veränderungen auftreten.

Ein Kriterium für krebserzeugende Fasern gibt es als Ausschlussdefinition in der EU: Diese definiert Fasern mit einem längengewichteten mittleren geometrischen Durchmesser GMD – 2 × SE > 6 µm als nicht zwingend krebserregend (SE entspricht dem Standardfehler).

3.5.3.1 Carbonfasern

Zhang et al. (2001) haben im Rahmen einer Instillationsstudie an Ratten Carbonfasern (CF) und Carbonfaserkompositpartikel (Carbon Fibre Composite, CFK) im Vergleich zu positiven und negativen Referenzmaterialien untersucht. Als Positivkontrolle wurden Quarz und die Asbestfaser Chrysotil eingesetzt, als negatives Referenzmaterial TiO_2 und die Aluminiumfaser SAFFIL. Bei einer Instillation werden die Stoffe als Suspension mit einer Kanüle in die Lungen

der Ratten injiziert. Die Suspensionskonzentration von fasrigen CF und partikelförmigen CFK in Kochsalzlösung betrug 50 mg/ml und verblieb mindestens einen Monat in der Lunge. Die Bronchioalveolare Lavage zeigte keinen Anstieg der Anzahl an Lymphozyten durch die CF- und CFK-Behandlung. Die Untersuchung des Lungenfeuchtgewichts zeigte nur bei mit Quarz und Chrysotil behandelten Tiere signifikante Antworten und die Gewichtszunahme war bei der Behandlung mit CF, CFK und TiO_2 gering. Die CF- und CFK-Stäube wurden phagozytiert und damit abgereinigt.

Eine Zusammenstellung zur Veränderung der biologischen Wirksamkeit freigesetzter Fasern der drei Typen Asbest, CNT und Carbonfasern aus bearbeiteten Kompositmaterialien haben Wang et al. (2017) publiziert. Ihre wesentlichen Beobachtungen sind in Tabelle 25 gelistet, die Schlüsse, die sie daraus gezogen haben, lauten:

- Kommen Nanomaterialien (Nanopartikeln und CNT) als Zuschlagstoffe in Kunststoff zum Einsatz, so liegen die Gewichtsprozent in den resultierenden Verbundwerkstoffen im niedrigen einstelligen Bereich, wodurch bei der Bearbeitung eine entsprechend geringe Menge an Fasern freigesetzt wird.
- Demgegenüber können CF mehr als 50 Vol-% der Verbundwerkstoffe ausmachen, weshalb die freigesetzte Menge deutlich größer sein kann und gesundheitliche Beeinträchtigungen durch lungengängige Fasern mit geringem Durchmesser hervorgerufen werden können.
- CF haben normalerweise Durchmesser von 5 bis 10 µm und gelten damit als nicht lungengängig. Eine mechanische Bearbeitung kann aber Fasern mit geringerem Durchmesser freisetzen, die dann lungengängig werden.

Tabelle 25: Zusammenfassung der wesentlichen Beobachtungen von Wang et al. (2017).

Faserförmiger Füllstoff	Matrix	Freisetzung	Umwandlung freigesetzter Fasern
Verschiedene CF	Epoxidharz	Hammermühle, Trocken- und Nassschneider, Mahlen, Bohren	Entlang der Achse gespaltene Fasern können freigesetzt werden → kleine Durchmesser, evtl. lungengängig
Verschiedene CF	Epoxidharz	Erwärmung auf 400 °C und 850 °C	Bei 850 °C Fragmentierung bei Oxidation, Verlust kristalliner Eigenschaft
Verschiedene CF	Polymer-Kabel	Zugbelastungstest bis Kabelversagen	Freisetzung lungengängiger Fasern, die entlang der Faserachse gespalten wurden

Quelle: Eigene Zusammenstellung, KIT-ITC.

Daraus resultieren aus der Sicht von Wang et al. (2017) folgende Fragestellungen, die weiteren Forschungsbedarf definieren:

- Die Toxizität von Kohlenstoff-Nanomaterialien wird durch verschiedene Faktoren wie Größe, Zellpermeabilität und Funktionalisierung beeinflusst.

- Zum Vergleich von zwei oder mehr Nanopartikeln (NP) auf Kohlenstoffbasis ist dasselbe Tiermodell nötig. Zum Vergleichen gleicher Arten von NP sollten verschiedene Zelllinienquellen und Tierarten herangezogen werden.
- Es lässt sich unterschiedliche Toxizität in Abhängigkeit der Oberflächenladung der NP beobachten, um dies konkret zu bestätigen ist eine Studie notwendig.
- Toxizitätsstudien gleicher Arten von Kohlenstoff-NP, die mit verschiedenen Techniken hergestellt wurden, sollten untersucht werden.

Da CF ebenfalls Kohlenstoff-Modifikationen sind, die in unterschiedlichen Strukturen und Oberflächenbeschaffenheiten vorliegen, zeigt dies die Notwendigkeit auf, dass verschiedene CF getestet werden müssen, eine Betrachtung der gesamten Materialgruppe wird schwierig.

Der Bericht der National Aeronautics and Space Administration (NASA) „Carbon Structure Hazard Control" von Yoder et al. (2015) fasst die Ergebnisse von vier in-vivo Toxizitätsstudien von Carbonfasern an Ratten zusammen, wobei Fasern betrachtet wurden, die zum Teil die WHO-Kriterien der Lungengängigkeit erfüllen.

Tabelle 26: Zusammenstellung der in-vivo-Studien an Ratten, die im Rahmen der NASA-Studie durch Yoder et al. betrachtet wurden.

Faser-Durchmesser (µm)	Faser-Länge (µm)	Faser--Konz. (F/cm3)	Exposition Std/ Tag	Exposition Tage/ Woche	Wochen			
7	20 – 60	40	6	5	16	bis zu 32 Wochen	Keine nachteiligen Auswirkungen auf die Lungenfunktion Keine Fibrose	Owen et al. (1986)
3,5	3500	40 – 80	1	5	2	1 und 14 Tage	Keine Carbonfasern im Gewebe Keine abnorme Lungenfunktion	Thomson et al. (1990)
3	10 – 60	40	6	5	16	15 und 80 Wochen	Vereinzelte, nicht-faserförmige Partikel in der Lunge Keine abnormale Lungenfunktion Keine Fibrose	Waritz et al. (1990)

Faser-Durchmesser (µm)	Faser-Länge (µm)	Faser--Konz. (F/cm3)	Exposition Std/ Tag	Exposition Tage/ Woche	Wochen			
1 – 4	NA	50 – 90	6	5	-	4 und 12 Wochen	Temporäre Lungenentzündung (reversibel nach 10 Tagen) Keine histopathologische Reaktion oder Lungenfibrose	Wahrheit et al. (1994)

Quelle: Eigene Zusammenstellung, KIT-ITC.

Waritz et al. (1990) haben eine Inhalationsstudie mit Ratten durchgeführt, bei der die Tiere einem Carbonfaser-Aerosol mit einer Dosis von ca. 40 F/cm^3 (entspricht 40 Mio. F/m^3) ausgesetzt wurden. Die Expositionsdauer betrug 6 Std./Tag an 5 Tagen in der Woche für insgesamt 16 Wochen. Im Durchschnitt hatten die Fasern einen Durchmesser von ca. 3 µm und 72 % der Fasern befanden sich in einem Längenintervall von 10 – 60 µm, das heißt, dass die WHO-Kriterien erfüllt wurden. Die Ratten wurden nach 2, 8, 12 und 16 Wochen Expositionszeit sowie nach 35 und 80 Wochen Erholungszeit geopfert und die Lungen untersucht. Im Gegensatz zu einigen nicht faserartigen Partikeln wurden keine Fasern im Lungengewebe gefunden. Eine histopathologische Analyse konnte keine fibrotischen Reaktionen oder Rückschlüsse auf eine veränderte Lungenfunktion feststellen.

Warheit et al. 1994 haben eine in-vivo Studie mit Ratten durchgeführt, die Pech-basierten WHO-Carbonfasern mit einem Durchmesser von 1 bis 4 µm ausgesetzt wurden. Die Expositionsdauer betrug 5 Tage mit einem täglichen Intervall von 5 Stunden. Im Anschluss wurden die Tiere über einen Zeitraum von unmittelbar nach der Exposition bis 3 Monate danach getötet und untersucht. Festgestellt wurde eine transiente, reversible Entzündungsreaktion des Lungengewebes, die 10 Tage nach der Exposition abgeklungen war. Es konnten keine signifikanten histopathologischen Veränderungen des Lungengewebes über die gesamte betrachtete Erholzeit festgestellt werden. Die Autoren schlussfolgern, dass die pulmonale Toxizität von Pech-basierten WHO-Carbonfasern sich von der bekannten Toxizität von Asbest oder Silica-Stäuben unterscheiden muss.

Die NASA interpretiert die Auswertung dieser Studien als Hinweis auf eine geringere Toxizität der Carbonfasern im Vergleich zu Asbest und Silika-Stäuben. Allerdings ist die jüngste (Warheit et al. 1994) dieser Studien bereits über 20 Jahre alt, und die Faserlängen sind, wie im Fall von Thomson et al. (1990), teilweise extrem. Für steife Fasern von 3500 µm, also 3,5 mm, ist im Allgemeinen nicht zu erwarten, dass diese inhalierbar sind, auch wenn die Kriterien der WHO-Faser keine Obergrenze für die Faserlänge definieren. Damit ist es nicht überraschend, dass bei dieser Studie im Gewebe keine Fasern gefunden wurden. Auch die Studie von Owen et al. (1986) hat eine begrenzte Aussagekraft, da mit einem Durchmesser von 7 µm nicht-lungengängige Fasern untersucht wurden, was auch von Yoder et al. (2015) eingeräumt wird. Folglich basiert die Bewertung der NASA vornehmlich auf den Studien von Waritz et al. (1990) und Warheit et al. (1994) die Fasern mit relevanten WHO-Abmessungen verwendet haben.

In einer Zusammenfassung von 2004 analysiert und bewertet Oberdörster die Ergebnisse von zwei in-vivo Inhalationsstudien von Carbonfasern bei Ratten:

In der ersten Studie wurde vom Renal Cell Carcinoma (RCC) in Basel (Schweiz) die Biopersistenz von lungengängigen Carbonfasern untersucht. Diese hatten eine Durchschnittslänge von 6,74 µm bei einem mittleren Durchmesser von 0,92 µm im Aerosol; somit waren die WHO-Kriterien erfüllt. Die Ratten wurden über 5 Tage 6 Stunden am Tag einer Konzentration von 16 mg/m^3 ausgesetzt, wobei die Faserlast in der Luft für die als besonders gefährlich eingeschätzten Fasern mit einer Länge von > 20 µm bei 92 F/cm^3 lag. Nach der Exposition wurden die Ratten nach 1, 3, 15, 29 und 92 Tagen geopfert und die Anzahl der in der Lunge enthaltenen Fasern wurde nach einem Auflösen des Lungengewebes mittels Rasterelektronenmikroskopie (Scanning Electron Microscopy, SEM) abgeschätzt. Die Ergebnisse zeigen, dass die Faserretention in der Lunge sehr stark von der Faserlänge anhängt. Während die Fasern mit einer Länge von < 20 µm in unter 60 Tagen zur Hälfte aus der Lunge entfernt waren, war die Retentions-Halbzeit bei den längeren Fasern größer und in einem Bereich von 100 bis 107 Tagen. Laut Oberdörster müsste der Wert aufgrund der Unlöslichkeit der Fasern eigentlich bei mehreren hundert Tagen liegen. Er vermutet, dass längere Fasern > 20 µm wahrscheinlich in der Lunge gebrochen werden und die kleineren Fragmente dann durch die Makrophagen entfernt werden können, entsprechend dem Modell von Donaldson folgend, wie es in Abbildung 95 dargestellt ist. Hierauf deutet nach seiner Analyse auch eine anfängliche Zunahme der Anzahl von nicht-faserartigen Partikeln sowie kurzen Fasern in der Lunge am Anfang der Erholzeit hin. Oberdörster beschreibt das Abbauverhalten der Carbonfasern in der Lunge als vergleichbar zu dem Verhalten bei anderen Partikeln und Kurzfasern geringer Toxizität, betont aber, dass für die Bewertung möglicher negativer Effekte der Fasern in der Lunge eine längerfristige Inhalationsstudie erforderlich ist.

In der weiteren Studie, die von Oberdörster in diesem Bericht beschrieben wird, wurden Ratten über drei Monate 5 Tage die Woche mit jeweils 5 Stunden pro Tag sehr hohen WHO-Carbonfaser-Konzentrationen von 64, 225 und 694 F/cm^3 ausgesetzt. Hierbei betrug der Durchmesser der Pech-basierten Fasern ca. 1 bis 1,5 µm und der Anteil der Fasern mit einer Länge von > 20 µm mit besonders hoch eingeschätztem kanzerogenen Potential 15, 51 und 158 F/cm^3. Innerhalb einer nachgeschalteten, dreimonatigen Erholphase wurden die Ratten zu unterschiedlichen Zeitpunkten getötet und die Lungen untersucht. Bei den Untersuchungen wurde eine hohe Biopersistenz mit sehr langen, dosisabhängigen Retentions-Halbzeiten der Carbonfasern in der Lunge festgestellt. Sie betrug für die geringe Dosis ca. 250 Tage, für die mittlere Dosis ca. 500 Tage und mehr als 1000 Tage für die hohe Dosis. Auch eine interstitielle Translokation von Fasern in die Lymphknoten ist beobachtet worden. Trotz dieser Ergebnisse wurden keine verstärkten fibrotischen Reaktionen in den Lungen der Ratten festgestellt. Auch die Entzündungsreaktion bewertet Oberdörster als geringer im Vergleich zu dem, was man für beständige Fasern mit fibrotischem und kanzerogenem Potential erwarten kann. Auf Basis des vorliegenden Kenntnisstands kommt er zu der Einschätzung, dass nur Konzentrationen, die eine Overload-Situation hervorrufen, langfristig zu Lungentumoren führen. Eine Overload-Situation beschreibt auf Basis einer sehr hohen Dosis die Überforderung der körpereigenen Reinigungsmechanismen, die Lunge zu reinigen. Geringere Dosen, die keinen Overload herbeiführen, führen hingegen nach seiner Vermutung im Gegensatz zu kanzerogenen Fasern nicht zu Tumoren. Folglich zieht Oberdörster für Carbonfasern auf Basis der Ergebnisse den Vergleich zu Partikeln und Fasern mit geringer Zytotoxizität. In seinem Fazit betont Oberdörster, dass für eine finale Bewertung des kanzerogenen Potentials von Carbonfasern weitere, langfristige Studien notwendig sind.

Westphal et al. (2019a) haben in-vitro die Toxizität von Carbonfaser-Stäuben (kryo-gemahlene Carbonfaser-Matten) sowie CFK-Schleifstäuben (aus Verarbeitungsbetrieben) untersucht. Sämtliche Proben enthielten Carbonfasern auf PAN-Basis. Eine Analyse der geometrischen Abmessungen der Fasern in den unterschiedlichen Proben ergab einen Durchmesser von stets ≥

3 µm, weshalb das WHO-Kriterium nicht erfüllt war. Zur Analyse der Toxizität wurde sowohl der LDH-Test (Messung der freigesetzten Menge von **L**actat **D**e**h**ydrogenase, kurz LDH) als auch der partikel-induzierte Zellmigrationstest (PICMA) verwendet. In der Auswertung hat sich gezeigt, dass eine signifikante Zellmigration erst bei sehr hohen Konzentrationen der Carbonfasern auftritt und sich aus dem Vergleich zu Partikeln bekannter Entzündungswirkung eine schwach entzündliche Wirksamkeit ergibt. Durchgeführte Löslichkeitsversuche deuten jedoch auf eine sehr hohe Biopersistenz der Fasern hin. Die Autoren kommen zu dem Fazit, dass weitere Untersuchungen, insbesondere mit WHO-Fasern und Carbonfasern auf Pech-Basis, für eine abschließende Bewertung nötig sind.

Die dargestellten Ergebnisse der untersuchten Studien geben Hinweise auf eine geringere Toxizität der Carbonfasern sowie von CFK-Stäuben im Vergleich zu bekannten kanzerogenen Fasern und Partikeln wie Asbest oder kristallinem Siliziumdioxid (SiO_2). Erst sehr hohe Konzentrationen an einatembaren, lungengängigen Fasern in der Atemluft, die zu Overload-Situationen in der Lunge führen können, werden als kritisch eingeschätzt. Diese These wird gestützt durch die Beobachtung von Westphal et al. (2019a), dass sich erst bei sehr hohen Dosen eine signifikante Entzündungswirkung im PICMA-Test beobachten lässt. Dennoch haben mehrere Studien eine hohe bis sehr hohe Biopersistenz für Carbonfasern festgestellt. Daher sind für eine abschließende Bewertung weitere, langfristige Untersuchungen nötig, um abschätzen zu können, wie sich die Verweildauer der Fasern in der Lunge über einen längeren Zeitraum auswirkt. Der aktuelle Vergleich der kurzfristigen Ergebnisse nach Erholzeiten von max. 3 Monaten zu Ergebnissen von ähnlichen Studien mit bekannten kanzerogenen Fasern deutet darauf hin, dass Carbonfasern eine geringe Zytotoxizität aufweisen.

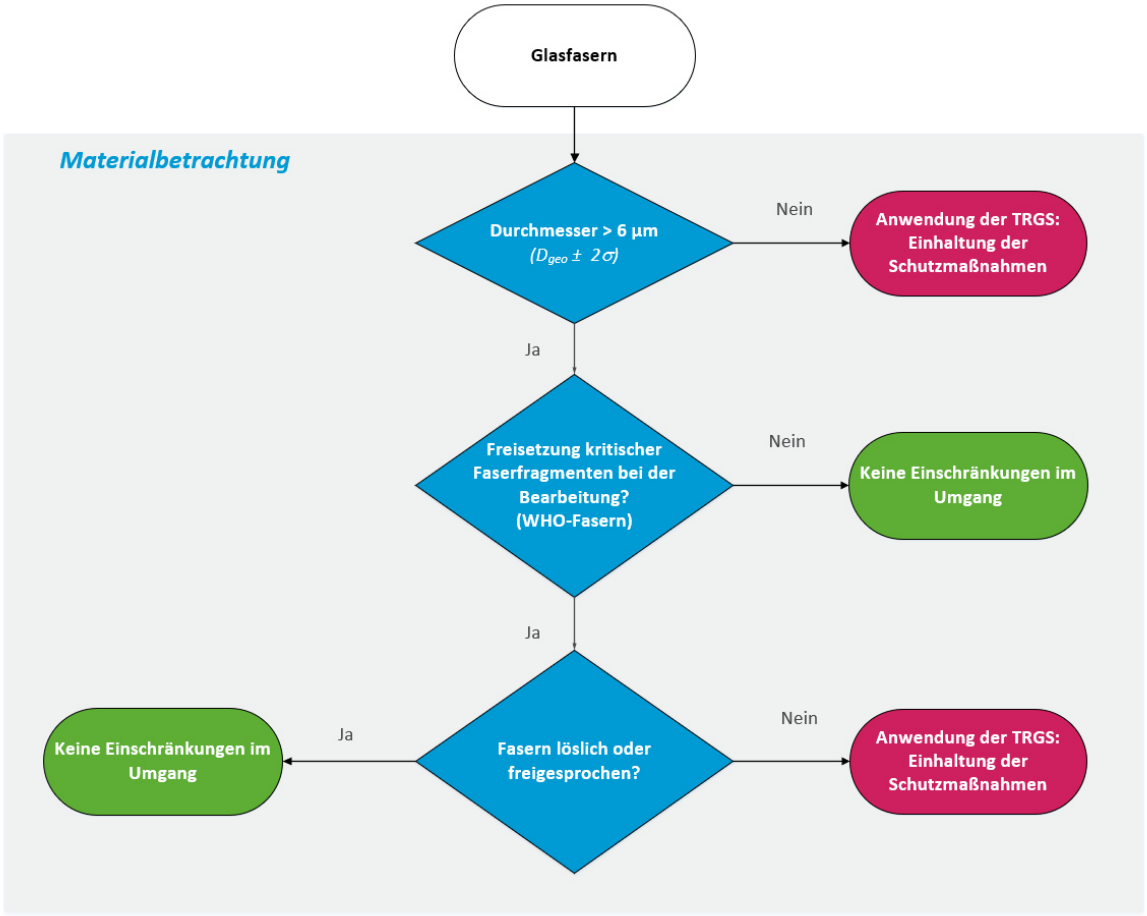
Für Carbon- und andere Fasern lassen sich etliche Fragen formulieren, die teilweise Gegenstand aktuell laufender Projekte wie Carbon Fibre Cycle sowie CarboBreak sind:

- Wie ist die Biopersistenz von Carbonfasern in physiologischen Medien im Vergleich zu Asbest, Glasfasern und anderen Fasern (vgl. Abbildung 97)?
- Welche Rolle spielt die Faseroberfläche bzw. das Fasermaterial neben den bekannten toxikologischen Parametern wie Biopersistenz und Rigidität für das kanzerogene Potential?
- Eine generelle Obergrenze für die Länge inhalierbarer Fasern ist nicht definiert. Hierzu sollten weitere Studien zu Trennkurven für Fasern in der Lunge recherchiert bzw. durchgeführt werden.

3.5.3.2 Glasfasern

Laut der Europäische Kommission 27.06.1967 sowie Europäische Kommission 03.09.1996 und Europäische Kommission 05.12.1997 werden künstlich hergestellte, glasige (Silikat-) Fasern ähnlich wie in der TRGS 905 in die Kategorien 0, 2 oder 3 eingestuft. Als Kriterium zur Beurteilung ihrer kanzerogenen Potentiale, und damit der Einstufung in die Kategorien 0, 2 oder 3, dienen der mittlere geometrische Faserdurchmesser d, abzüglich der zweifachen Standardabweichung sowie der KNB- Index, der im Folgenden genauer erläutert wird.

Abbildung 97: Auswahlpfad für den Umgang mit Glasfasern.



Quelle: Eigene Darstellung, KIT-ITC.

Der mittlere geometrische Faserdurchmesser d abzüglich der zweifachen Standardabweichung wird am gesamten Objekt bestimmt, das heißt, dass spitz zulaufende Fasern mit deutlich größerem Ausgangsdurchmesser trotzdem als kanzerogen oder krebsverdächtig eingestuft werden können.

Liegt der mittlere geometrische Faserdurchmesser unterhalb des Werts von 6 µm, wird die weitere Einordnung über den KNB-Index durchgeführt. Dabei beschreibt der KNB-Index den Masseanteil der Alkali- und Erdalkalimetalloxide, konkret die Summe der Massegehalte an Natriumoxid Na_2O, Kaliumoxid K_2O, Lithiumoxid Li_2O, Kalziumoxid CaO, Magnesiumoxid MgO, Strontiumoxid SrO und Bariumoxid BaO. Als Grenze zwischen den Kategorien 3 (krebsverdächtig) und 2 (kanzerogen) gilt der Wert von 18 Masse-% der genannten Metalloxide (Tabelle 27).

Tabelle 27: Einordnung von künstlich hergestellten, glasigen (Silikat-) Fasern bezüglich ihres kanzerogenen Potentials.

Kategorien der krebserregenden Wirkung		mittlerer geometrischer Faserdurchmesser d	KNB-Index
Kategorie 3	krebsverdächtig (possibly carcinogenic)	d < 6 µm	> 18 Ma.-%
Kategorie 2	kanzerogen (probably carcinogenic)	d < 6 µm	≤ 18 Ma.-%
Kategorie 0	nicht krebserregend	d > 6 µm	

Quelle: Eigene Zusammenstellung, KIT-ITC.

Abhängig von der Art der Glasfasern gibt es auch ganz spezifische Ausnahmen, zum Beispiel wurde für Glasfasern aus JM-902-Glas vom Research and Consulting Institut in Genf eine Biobeständigkeitsstudie an Ratten durchgeführt. Die verschiedenen Halbwertszeiten zum Abbau dieser speziellen Glasfasern in den Lungen der exponierten Ratten wiesen deutlich kürzere Werte auf, als gefordert (Methoden vgl. Kapitel 3.5.3). Basierend auf diesen Ergebnissen wurden Glasfasern aus diesem Glas von der kanzerogenen Wirkung freigesprochen, müssen aber als „reizend“ deklariert und gekennzeichnet werden (Teschner 2019).

Um die Auflösbarkeit von Glasfasern in biologischen Fluiden (wässrige und saure Milieus) anhand der chemischen Zusammensetzung abschätzen zu können, wurden Faktoren eingeführt, die es erlauben, die chemische bzw. biologische Resistenz der Gläser abzuschätzen. Diese Faktoren werden aus den Mol-Anteilen C_X bestimmter Oxide im Glas ermittelt, das sind in erster Linie die Alkali- und Erdalkalisalze, die sich im KNB-Index widerspiegeln.

Der Faktoren der biologischen Auflösbarkeit C_{bio}, der Wasserbeständigkeit C_{moist} und der Säurebeständigkeit C_{acid} lassen sich anhand der folgenden Gleichungen berechnen:

Biologische Auflösbarkeit

$$C_{bio} = \frac{C_{SiO_2} + C_{Al_2O_3}}{C_{B_2O_3} + C_{R_2O} + C_{RO}}$$

Wasserbeständigkeit

$$C_{moist} = \frac{C_{SiO_2} + C_{Al_2O_3} + C_{B_2O_3}}{C_{R_2O} + C_{RO}}$$

Säurebeständigkeit

$$C_{acid} = \frac{C_{SiO_2}}{C_{Al_2O_3} + C_{B_2O_3} + C_{R_2O} + C_{RO}}$$

Dabei bezeichnen die Indizes R_2O und RO die übrigen Oxide, die auch in den KNB-Index einfließen.

Aus Sicht des Arbeitsschutzes wird nach Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA) 03.05.2016 der Kanzerogenitätsindex K_i betrachtet, der sich aus der Differenz zwischen der Summe der Massengehalte (in v.H.) der Oxide von Natrium, Kalium, Bor, Calcium, Magnesium, Barium und dem doppelten Massengehalt (in v.H.) von Aluminiumoxid berechnet:

$K_I = (C_{Na2O} + C_{K2O} + C_{B2O3} + C_{CaO} + C_{MgO} + C_{BaO}) - 2\ C_{Al2O3}$

Es werden drei Auswertungsszenarien angegeben:

- Glasige WHO-Fasern mit $K_I \leq 30$ → Kategorie 1B
- Glasige WHO-Fasern mit $30 < K_I < 40$ → Kategorie 2
- Glasige WHO-Fasern mit $K_I \geq 40$ → nicht als krebserzeugend einzustufen.

Für einige Faserarten wie z. B. kristalline Fasern aus Al_2O_3, K_2TiO_3, SiC, liegen für die WHO-Geometrie positive Befunde aus Tierversuchen vor, diese werden automatisch in die Kategorie 2 eingestuft.

Betrachtet man die laut Kapitel 2.2.3.2 in Rotorblättern von Windenergieanlagen am häufigsten verwendeten Glasfaserarten, so kommen in den Verbundmaterialien in erster Linie E- und ECR-Gläser zum Einsatz. Ihre typische Zusammensetzung in Masse-Prozent ist in Tabelle 28 aufgelistet.

Tabelle 28: Eigenschaften der in Rotorblättern von Windenergieanlagen vorwiegend zum Einsatz kommenden Arten von Glasfasern (nach Kapitel 2.2.3.2).

	Typ E = polyvalentes Glas (E = Electric)	**Typ ECR = säurebeständiges Glas (E-Glass Corrosion Resistant)**
Chemische Bestandteile (Gew.-%)	Aluminiumborsilikat-Glas < 2 % Alkalioxide ca. 90 % Marktanteil wird in basischer und saurer Umgebung angegriffen	Faser mit besonders hoher Korrosionsbeständigkeit
SiO_2	53-54	54-62
Al_2O_3	14-15	9-15
CaO	20-24	17-25
MgO		0-4
B_2O_3	6-9	
Na_2O	0-0,7	0-2
Fe_2O_3		0-0,8
TiO_2		0-4
Summe KNB-Anteile	≥ 40	≥ 26
Biologische Auflösbarkeit	C_{bio} = 2,04	
Wasserbeständigkeit	C_{moist} = 2,56	
Säurebeständigkeit	C_{acid} = 1,42	

Quelle. Eigene Zusammenstellung, KIT-ITC, nach AVK-Handbuch Faserverbundwerkstoffe (Materialwerte) und Teschner (Biologische Löslichkeit und Beständigkeit).

In beiden Materialien ist der KNB-Index signifikant größer als die geforderten 18 Masse-%, sodass eine Einordnung nur noch in die Kategorien 0, also nicht krebserregend, oder 3 und damit als krebsverdächtig, möglich ist, soweit keine konkreteren Daten vorliegen.

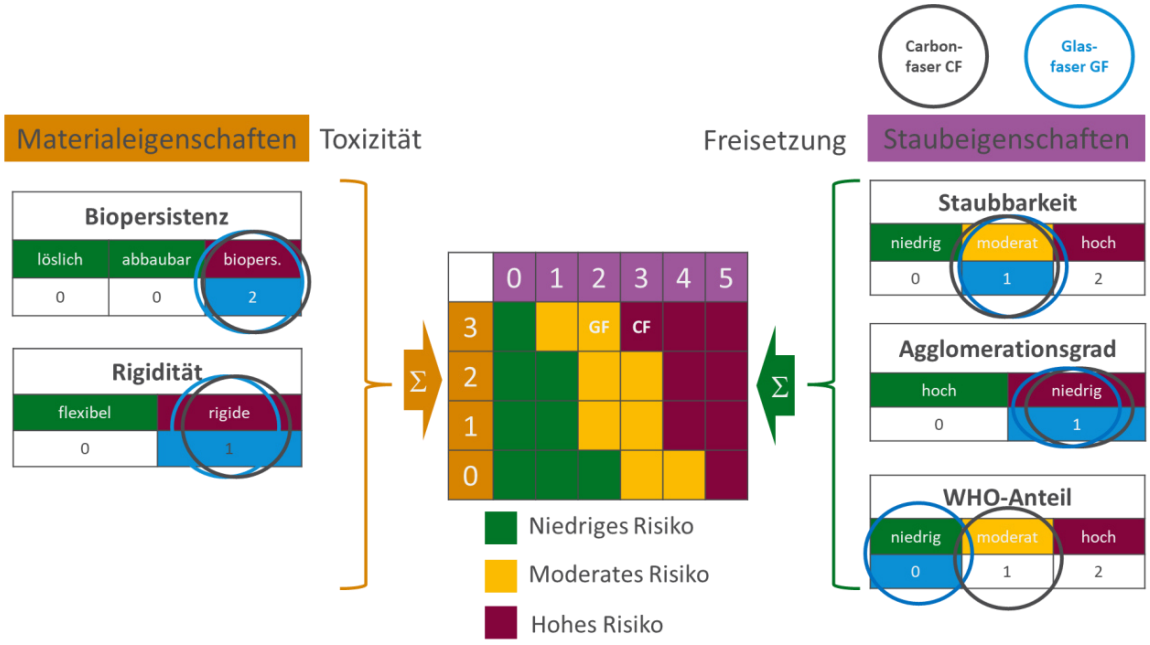
Für die Betrachtung von Glasfasern im Rückbau von Rotorblättern ist gilt nach dem Handbuch Faserverbundkunststoffe/Composites (AVK - Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe e. V. (AVK) 2013), dass die für Verstärkung zum kommenden Einsatz Glasfasern typischerweise Durchmesser im Bereich von 9 bis 24 µm haben, was auch im Überblick von Sathishkumar et al. (Sathishkumar et al. 2014) gezeigt wird. Damit liegt der mittlere geometrische Faserdurchmesser über den geforderten 6 µm. Da aber unter anderem Mattenklott et al. (Mattenklott und Gelder 2019) und Arnone (Arnone 2018) gezeigt haben, dass auch bei der Bearbeitung von GFK kritische Faserfragmente mit WHO-Geometrie freigesetzt werden, wird in der weiteren Betrachtung der Prozesse und deren Einordnungen davon ausgegangen, dass die Glasfasern nach TRGS 905 als krebsverdächtig (Kategorie 1B nach GHS, Tabelle 20) einzustufen sind. Damit müssen die entsprechenden Grenzwerte für anorganische Faserstäube aus der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA) Mai 2002 angesetzt werden.

3.5.4 Risikovergleich anhand der Matrix

Um CF und GF und ihre Fragmente einschätzen zu können, wird ein Vergleich bezüglich der Parameter in der zuvor vorgestellten Matrix zur Risikogruppierung durchgeführt. Auf der linken Seite der Matrix gehen die oben beschriebenen Materialeigenschaften ein, insbesondere unter dem Aspekt der Toxizität als Folge der hohen Biopersistenz, die mit zwei Punkten bewertet wird. Außerdem spielt die Rigidität eine wichtige Rolle. Bezüglich dieser beiden Faktoren kann man sowohl bei CF als auch bei GF davon ausgehen, dass diese biopersistent und rigide und somit mit 3 Punkten zu bewerten sind.

Auf der rechten Seite der Darstellung sind Staubeigenschaften und Freisetzungsverhalten enthalten. Wichtig sind hier Staubbarkeit, Agglomerationsgrad und WHO-Anteil. Diese Größen können nicht pauschal ohne Freisetzungsszenario beantwortet werden. In erster Näherung kann für CF eine Staubbarkeit bei mechanischer Beanspruchung, ein niedriger Agglomerationsgrad und ein moderater WHO-Anteil postuliert werden, auch wenn der WHO-Anteil den bisherigen Recherchen zufolge sehr stark vom Typ der verwendeten CF-Faser abhängig sein kann.

Abbildung 98: Risikoermittlung am Arbeitsplatz nach nanoGRAVUR für Carbonfasern (CF, schwarze Kreise) und Glasfasern (GF, blaue Kreise).



Quelle: Eigene Darstellung, KIT-ITC, nach Vorbild NanoGRAVUR (Göhler und Stintz 2019).

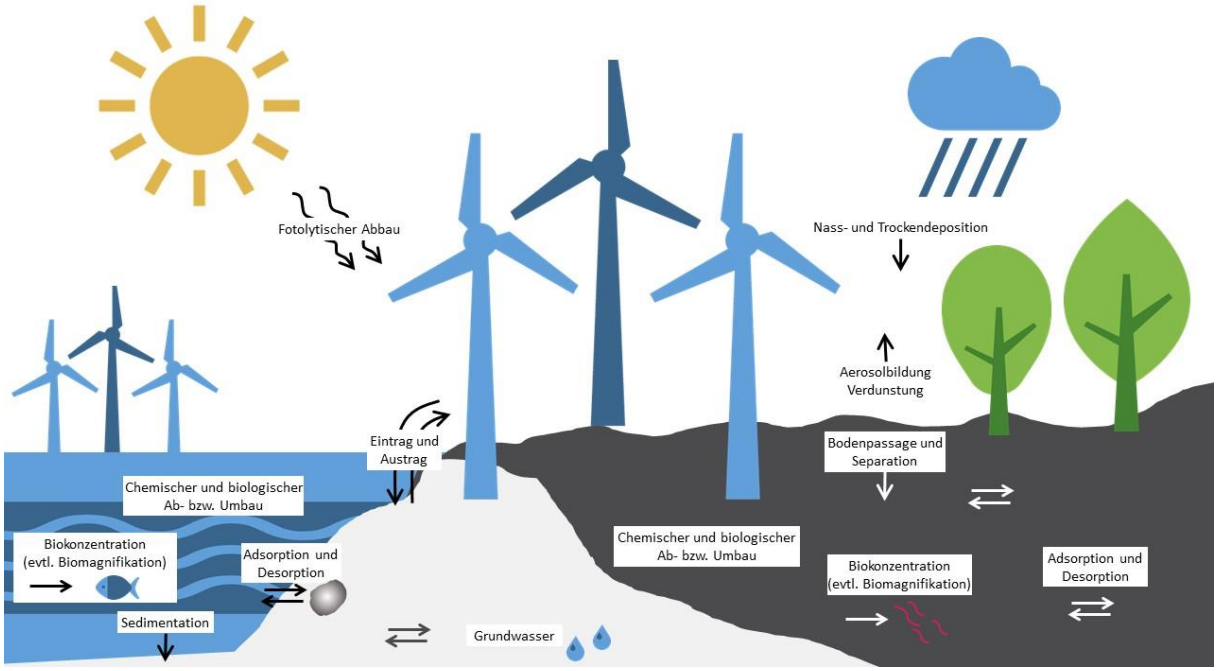
Wendet man diese Matrix auf GF (blaue Kreise), bzw. CF (schwarze Kreise) an, so lässt sich für CF ein höheres Risiko gegenüber GF vermuten, da verschiedene Untersuchungen zur Behandlung von CF und CFK vorliegen, die einen moderaten WHO-Anteil aufweisen.

Da nach einer solch einfachen Bewertung CF voraussichtlich ein höheres Risiko als GF aufweisen, sollte im Weiteren geprüft werden, welche Carbonfasern in Rotorblättern verbaut sind, da bekannt ist, dass die beiden großen Gruppen von Carbonfasern, die sich bezüglich des Präkursors in PAN-basierte und Pech-basierte Carbonfasern unterteilen lassen, ein unterschiedliches Splitterbruchverhalten aufweisen können; auch spezielle PAN Fasern können ein Splitterbruchverhalten aufweisen (s. o.). Diese Information sollten bezüglich der Rotorblatt-Materialien im Rahmen von Kapitel 2 in diese Betrachtungen einfließen.

3.5.5 Ökotoxikologische Betrachtung der Materialien

Nach der in Kapitel 3.2 beschriebenen Methode für die Literaturstudie, werden auch die in diesem Rahmen gewonnenen Informationen bezüglich Risiken für die Umwelt ausgewertet. Hierfür stehen neben den aktuellen Publikationen zum Beispiel in einem Teil der Sicherheitsdatenblätter die Werte für die letale Dosis 50 (LD_{50}, im englischen LC = lethal concentration), der Wert, bei dem in einem typischen ökotoxikologischen Testsystem 50 % der Organismen versterben, zur Verfügung. Dies sind in den meisten Fällen der akute Daphnientest (OECD Guideline 202), der akute Fischtest (OECD Guideline 203) und der Algentest (DIN EN ISO 8692; OECD Guideline 201), also die aquatischen Systeme.

Abbildung 99: Mögliche Prozesse auf und durch Fremdstoffe in der Umwelt.



Quelle: Eigene Darstellung, KIT-ITC.

Abbildung 99 zeigt einen Überblick über die generell möglichen Prozesse, wie Fremdstoffe in der Umwelt einwirken können und umgekehrt der Fremdstoff selbst sich durch Umwelteinflüsse ändern kann. Dies gilt für alle Fremdstoffe, die während ihrer Produktion, Nutzung oder Entsorgung in die Umwelt eingebracht werden. Im Fokus dieser Studie stehen die Prozesse bei der baustellenseitigen Abfallbehandlung, deren Aufbereitung und Verwertung von Rotorblättern an Windenergieanlagen. Die möglichen Einträge in Umwelt und Natur werden daher in der Folge vor allem bei der Demontage am Standort der WEA und der Zerkleinerung bei einem Aufbereiter betrachtet. Bei diesen Prozessen werden aus dem Rotorblatt selbst Feststoffe freigesetzt, wobei bei Prozessen mit Wasserspülung das Abwasser ggfs. auch zu betrachten ist.

Materialien wie die CF und GF sind als unlöslich und inert zu betrachten, sodass einige Prozesse wie der chemische Ab- und Umbau nicht zum Tragen kommen. Dies heißt aber auch, dass sie Kandidaten für eine mögliche Persistenz und damit Bioakkumulation sind, da sie lange Zeit in der Umwelt vorliegen und von Lebewesen aufgenommen werden können. Da die meisten dieser Stoffe auch säurebeständig sind, ist aufzuklären, ob sie (unverändert) ausgeschieden werden, oder sich in manchen Organismen anreichern können. Damit ist eine Freisetzung in die Umwelt generell zu vermeiden.

Bei der baustellenseitigen Abfallbehandlung von Rotorblättern und den darin enthaltenen Bauteilen aus CFK , deren Aufbereitung und Verwertung werden in den Arbeitspaketen 4 bis 7 unterschiedliche Prozesse untersucht. Dabei kommen auch wasserberieselte Trennprozesse zum Einsatz, bei denen ein Eintrag von Carbonfasern und Carbonfaserfragmenten in Böden und Gewässer möglich ist. Nicht nur in diesem Kontext ist die Gefährlichkeit der Materialien auf aquatische und terrestrische Systeme zu prüfen. Eine Einordnung kann dabei für einen Teil der in Rotorblättern zum Einsatz kommenden Materialien, wie zum Beispiel die verwendeten Harze, die Wassergefährdungsklasse WGK ermöglichen.

Die Wassergefährdungsklasse (WGK) definiert gemäß Wasserhaushaltsgesetz (WHG) vom 31. Juli 2009 und seinen Fortschreibungen wassergefährdende Stoffe als „feste, flüssige und

gasförmige Stoffe, die geeignet sind, dauernd oder in einem nicht nur unerheblichen Ausmaß nachteilige Veränderungen der Wasserbeschaffenheit herbeizuführen“.

Zur Beurteilung der ökotoxikologischen Wirkung von Fremdstoffen auf Gewässer, Böden und Fauna und Flora gibt es eine Vielzahl von Testmethoden. Im Folgenden werden einige ausgewählte Testmethoden für terrestrische und aquatische Systeme vorgestellt. Die Auswahl orientiert sich an den Werten, die für die bei der Verwertung von Rotorblättern relevanten Materialien ermittelt wurden und in den Sicherheitsdatenblättern angegeben sind.

3.5.5.1 Testmethoden zur ökotoxikologischen Beurteilung von akuter und chronischer Toxizität in aquatischen Systemen

3.5.5.1.1 Daphnientest

Daphnien sind sog. Cladoceren (Blattfußkrebse) und gehören zum Zooplankton in pelagischen Ökosystemen. Die Wasserflöhe werden u. a. durch ihre Größe, leichte Kultivierung und kurze Generationszeit als Testorganismen in ökotoxikologischen Tests sehr geschätzt. Als ein häufiger Vertreter in Toxizitätstests ist hier Daphnia magna zu nennen. Im **akuten Daphnientest** nach OECD 202 (OECD Guideline 202) werden die Immobilisierung (Schwimmunfähigkeit) oder die Mortalität nach 24 (bzw. 48) Stunden untersucht. Hierzu werden jeweils fünf Testtiere in Kulturröhrchen (10 ml) oder Bechergläsern (20 ml) in Dunkelheit dem Prüfstoff ausgesetzt. Je Konzentration sollten mindestens 20 Daphnien untersucht werden. Die Tiere sollten dabei maximal 24 Stunden alt sein, aus einer Laborzucht stammen, und ihre Muttertiere sollten ungefähr drei Wochen alt sein. Nach 24 und 48 Stunden wird dann das Prüfgefäß leicht berührt, um die Schwimmfähigkeit zu testen. Zur Bestimmung der akuten Toxizität werden die Konzentrationen so gewählt, dass drei bis vier Werte im Bereich zwischen dem LD_0- und dem LD_{100}- Wert liegen. Dabei soll mindestens ein Wert oberhalb und ein Wert unterhalb des LD_{50}-Wertes liegen. Dieser lässt sich anschließend rechnerisch oder graphisch durch Interpolation aus der Dosis-Wirkungs-Kurve ermitteln (Fent 2013).

Bei der Durchführung des **chronischen Reproduktionstests** nach OECD Guideline 211 wird entweder durch ständige Zudosierung des Prüfstoffes (Durchfluss-System) oder durch das periodische Auswechseln des Expositionswassers (semistatisches System) die Konzentration konstant gehalten. Die Beeinträchtigung der Reproduktion hat aufgrund seiner Empfindlichkeit in Versuchen als Messparameter die größte Bedeutung. Ziel ist bei chronischen Tests die Festlegung des NOEC-Wertes (No Observed Effect Concentration). Er zeichnet sich dadurch aus, dass nach 14 oder 21 Tagen weder eine letale Wirkung auf die Elterntiere, noch eine Verminderung der Reproduktionsrate, noch eine Verzögerung des ersten Auftretens von Nachkommen im Vergleich zu Kontrollen auftritt.

3.5.5.1.2 Fischtest

Bei Fischtests kommen Fische aus unterschiedlichen Ökosystemen wie z. B. die Regenbogenforelle (*Oncorhynchus mykiss*) zum Einsatz. Allerdings werden häufig auch warmadaptierte Fische wie Dickkopfelritzen (*Pimephales promelas*), Zebrabärblinge (*Danio rerio*) und Karpfen (*Cyprinus carpio*) verwendet, die nicht in unseren Ökosystemen auftreten. Daher muss hier die Aussagekraft für unsere Ökosysteme mitberücksichtigt werden. Im akuten Fischtoxizitätstest nach OECD 203 (OECD Guideline 203) wird die tödliche Wirkung von Prüfstoffen auf junge Fische ermittelt, wenn möglich im Durchflusssystem. Hierzu wird nach 24, 48 oder 96 Stunden der prozentuale Anteil toter Fische erfasst. Die LD_0- und LD_{100}- Werte werden so direkt gemessen, während der LD_{50}-Wert rechnerisch oder graphisch durch Interpolation aus der Dosis-Wirkungs-Kurve ermittelt wird. Für den Test werden etwa 50 bis 80

Testfische benötigt. Zur Reduktion von Fischversuchen ist als Ersatz auch der Zebrabärbling-Embryonentest zugelassen.

Der Early Life Stage Test (ELST) nach OECD 210 richtet sich an die frühen Lebensstadien. Die Juvenilstadien sind sehr empfindlich gegenüber Chemikalien und lassen meist eine gute Voraussage für den gesamten Lebenszyklus zu. Bestimmt werden die Mortalität, die Schlüpfrate sowie das Wachstum. Auch abnormes Verhalten und Aussehen wird festgehalten. Je nach Art kann die Dauer des Versuches zwischen 5 und 50 Tagen variieren. Der Test wird aus Kosten- und Zeitgründen dem akuten Toxizitätstest und dem Test über den ganzen Lebenszyklus (Life Cycle Test) vorgezogen. Des Weiteren fallen die Versuche an den Frühstadien noch nicht unter das Tierschutzgesetz.

Für die Untersuchung der chronischen Fischtoxizität wird die NOEC für einen Zeitraum von mindestens 14 bis 28 Tagen bestimmt. Untersucht werden Aussehen der Fische, Futteraufnahme und Schwimmverhalten unter standardisierten Bedingungen. Des Weiteren können chronische Wirkungen durch hämatologische und blutchemische Werte oder histologische Gewebsuntersuchungen am getöteten Tier festgestellt werden. Diese Tests haben sich allerdings aus ökonomischen Gründen nicht durchgesetzt, obwohl sie besonders für chronische und subakute Wirkungen eine größere Aussagekraft haben (im Gegensatz zur Bestimmung der Mortalität).

3.5.5.1.3 Algentest

Eine Möglichkeit zur Toxizitätsuntersuchung ist die Verwertung von radioaktiv markierter ^{14}C-Glucose in Algen zu bestimmen. Außerdem kann mit dem Grünalgentest nach OECD Guideline 201 die Wachstumshemmung untersucht werden. Hierfür wird in einem statischen System (Batch-Kultur) der Prüfstoff für eine Dauer von 48 bis 96 h in die Algen gegeben. Als Messgröße dient die Anzahl der Zellen pro Volumeneinheit. Sie wird über die optische Dichte (bei 578 nm) photometrisch bzw. fluorometrisch oder mit dem Coulter-Counter (Partikelzähler) bestimmt. Anhand der Wachstumskurve kann anschließend eine Auswertung erfolgen. Eine weitere Möglichkeit ist die Messung der Chlorophyll-a-Fluoreszenz. Die Fluoreszenz des Chlorophylls ist eine spontane Reaktion von Algen, die sich bei Störeinflüssen in der Photosynthese erhöht. Hierfür werden häufig u. a. die Algenarten *Raphidocelis subcapitata*, *Scenedesmus quadricauda*, *Chlorella vulgaris* und *Microcystis aeruginosa* verwendet.

3.5.5.1.4 Bakterientest

Bakterientests sind als Schnelltests sehr verbreitet, da sie aufgrund der kurzen Generationszeit und hohen Stoffwechselaktivität der Bakterien schnell durchführbar und kostengünstig sind. Allerdings reagieren Bakterien durch ihre schützende Zellwand und der ausgeprägten Fähigkeit zur Adaption oft weniger empfindlich als andere Arten und können daher generell kein Maß für die Toxizität eines Stoffes abbilden. Hierfür wird eine Kombination mehrerer Tests benötigt. Am häufigsten sind **Leuchtbakterientests** wie der Mikrotoxtest, bei dem *Aliivibrio fischeri* gefriergetrocknet zum Einsatz kommt. Sie nutzen die Eigenschaft der Leuchtbakterien, Biolumineszenz als Stoffwechselprodukt zu erzeugen. Dies geschieht durch das Enzym Luciferase, das unter Sauerstoff-Aufnahme mit dem reduzierten Flavin-Mononucleotid FMNH2 und einem weiteren organischen Molekül reagiert und in einen angeregten Zustand versetzt wird. Anschließend erfolgt durch die Regeneration die Lichtemission. Eine Reduktion der Lumineszenz zeigt somit eine Beeinträchtigung des Stoffwechsels an. Zur Messung werden hierfür die inkubierten Proben nach 15 bis 60 Minuten photometrisch erfasst. Der EC_{50}-Wert ist diejenige Konzentration, bei der die Lichtkonzentration um 50 % gesunken ist.

Bakterientests werden auch zur Beurteilung der Bioverfügbarkeit von Schadstoffen in Böden und bei der Erfolgskontrolle von Grundwasser, Boden- und Altlastensanierungen eingesetzt.

3.5.5.2 Testmethoden zur ökotoxikologischen Beurteilung von akuter und chronischer Toxizität in terrestrischen Systemen

3.5.5.2.1 Nematodentest

Bei dem Nematodentest nach DIN ISO 10872 handelt es sich um einen Kontakttest: Bestimmung der toxischen Wirkung von Sediment- und Bodenproben auf Wachstum, Fertilität und Reproduktion. Der untersuchte Testorganismus ist der *Caenorhabditis elegans* (C. elegans), eine Nematoden-Art. Diese ca. 1 mm langen Fadenwürmer kommen hauptsächlich im Porenwasser von Böden vor und ernähren sich hauptsächlich von Bakterien und abgestorbenem organischem Material. Dabei können Schadstoffe über das Porenwasser oder die Nahrung aufgenommen werden und Wachstum und Entwicklung der Nematoden beeinflussen.

Im Verlauf dieses Tests werden die Nematoden im ersten Entwicklungsstadium (direkt nach dem Schlüpfen) eingesetzt und über 96 h hinweg einem Schadstoff ausgesetzt. Innerhalb dieser Zeit durchlaufen die Nematoden einen kompletten Lebenszyklus.

Anschließend wird der abgetötete Organismus bezüglich folgender Parameter untersucht:

- Körpergröße der ausgewachsenen Organismen (Wachstum)
- Anzahl der abgelegten Eier (Fertilität)
- Anzahl Nachkommen (Reproduktion)

Alle Messergebnisse werden in Bezug auf eine nicht exponierte Kontrollgruppe angegeben.

3.5.5.2.2 Bakterienkontakttest

Ebenfalls ein Kontakttest, in diesem Fall für kontaminierte Feststoffe, ist der Bakterienkontakttest nach DIN 38412 (DIN 38412-3). Die im Boden lebende Bakterie Arthrobacter globiformis eignet sich gut zur Bewertung von akut toxischen Einflüssen, da Schadstoffe schnell in die Zelle des Einzellers aufgenommen werden. Aufgrund seines schnellen Generationswechsels (6 h) können auch chronische Effekte in nur 1 bis 2 Tagen ermittelt werden. Im hier beschriebenen Test wird nach 2 h Inkubation einer Sedimentprobe mit Schadstoff die Dehydrogenaseaktivität bestimmt. Dabei wird ein zugegebener Farbstoff Resazurin durch die Dehydrogenase (DHG) zu Resorufin, einen anderen Farbstoff, umgewandelt. Der Gehalt des fluoreszierenden Farbstoffs Resorufin kann photometrisch gemessen werden und ist demnach umso höher, je höher die DHG-Aktivität in der Bakterie ist. Schädigungen der Bakterie haben eine Senkung der DHG-Aktivität zur Folge, sodass die Kontrolle demnach einen höheren Resorufin-Gehalt als eine toxikologisch beeinträchtigte Probe hat. Ein Testergebnis ist erst gültig, sobald die Probe einen um Faktor 5 kleineren Farbstoffgehalt als die Kontrolle hat.

3.5.5.2.3 Sedimentkontakttest mit Myriophyllum aquaticum

Für Untersuchungen der vom Gesamtsediment ausgehenden Wirkung auf höhere Pflanzen kommt die Wasserpflanze *Myriophyllum aquaticum*, die durch Wurzen im Sediment Schadstoffe aufnehmen kann, zum Einsatz. Sie weist eine hohe Regenerationsfähigkeit und schnelles Wachstum auf.

Bei diesem Test wird über 10 Tage das Wachstum im mit Schadstoff belasteten Sediment beobachtet, aus der Anzahl der Neutriebe und des Frischgewichts wird die Wachstumsrate gegenüber einer Kontrollgruppe bestimmt, hieraus kann die EC50 Rate bestimmt werden.

3.5.6 Stand der Kenntnisse bei Carbonfasern

Aktuell ist fester Kohlenstoff im RIGOLETTO, der Datenbank zur Wassergefährdung von Stoffen, unter der Kennnummer 801 als „nicht wassergefährdend“ eingestuft. Dabei werden darunter die verschiedensten Modifikationen wie Aktivkohle, Kokskohle und sogar Diamanten zusammengefasst. Graphit wird sowohl in natürlicher Form als auch aus synthetischen Quellen darunter erfasst, sodass bisher teilweise die Annahme getroffen wird, dass aufgrund der graphitischen Struktur auch die Faserform mit dort einzusortieren ist. Inwieweit dies in Zukunft Bestand hat, ist genauer zu prüfen.

In einem Teil der Sicherheitsdatenblätter der betrachteten Materialien sind die LC_{50}- oder LC_{100}-Werte typischer Akut-Toxizitäts-Tests für aquatische Systeme enthalten.

Die Auswertung der Sicherheitsdatenblätter für Carbonfasern liefert Ergebnisse für einige dieser Tests, wie sie in Tabelle 29 dargestellt sind.

Tabelle 29: Ökotoxikologische Werte für eine kommerzielle Carbonfaser, die mit der CAS-Nummer 7440-44-0 als „Kohlenstofffaser (nicht graphitisch (Carbon))“ angegeben werden.

Testmethode	Richtlinie	Methodenbeschreibung	Werte für Carbonfaser	Quelle
Akuter Fischtoxizitätstest	OECD Guideline 203	tödliche Wirkung auf junge Fische wird ermittelt → nach 24, 48 oder 96 Stunden wird der prozentuale Anteil toter Fische erfasst	LC50 > 100 mg/l (96 h) beim Zebrabärbling (*Danio rerio*)	(SGL TECHNOLOGIES GmbH)
Akuter Daphnientest	OECD Guideline 202	Immobilisierung (Schwimmunfähigkeit) von Wasserflöhen wird getestet → nach 24 oder 48 Stunden wird der prozentuale Anteil schwimmunfähiger Wasserflöhe bestimmt.	EC50 > 100 mg/l (48 h) bei *Daphnia magna*	(SGL TECHNOLOGIES GmbH)
Algentox	OECD Guideline 201	Wachstum von Grünalgen wird über optische Dichte oder Partikelzähler bestimmt.	ErC50 > 100 mg/l (72 h) *Raphidocelis subcapitata*	(SGL TECHNOLOGIES GmbH)
Bakterientox	OECD 209	Belebschlamm aus kommunaler Kläranlage	> 1000 mg/l (3 h)	(SGL TECHNOLOGIES GmbH)

Quelle: Eigene Zusammenstellung, KIT-ITC, nach Sicherheitsdatenblättern für kommerzielle Carbonfasern.

3.5.7 Ökotoxizität von Glasfasern

Siliziumdioxid SiO_2, der Grundbestandteil aller Glasfasern, kommt natürlich im Boden vor und würde damit zunächst einmal keine Schwierigkeiten verursachen. Das säurelabile E-Glas wird im leicht sauren Milieu des Erdbodens, in dem bakterielle Fermentation organische Säuren wie Milch- oder Essigsäure bildet, in seine Ionen zerlegt. Alle entstehenden Abbauprodukte sind normale mineralische Bodenbestandteile, es entsteht kein organisches Material.

Dies gilt aber nicht für die säurebeständigen EPR-Glasfasern, die aufgrund ihrer Beschaffenheit als Fasern vorliegen bleiben. Da sie, wie oben beschrieben, in Abhängigkeit von ihrer Größe und

Zusammensetzung als krebserregend der Kategorie 2 oder 3 und damit humantoxisch eingestuft sind, dürfen sie nicht in die Umwelt eingetragen werden.

Tabelle 30: Ökotoxikologische Werte für kommerzielle Glasfasern.

Testmethode	Richtlinie	Werte für Glasfasern	Quelle
Akuter Fischtoxizitätstest	OECD Guideline 203	LC50 > 1000 mg/l (96h, statisch)	(Lauscha Fiber International GmbH)
Akuter Daphnientest	OECD Guideline 202	EC50 > 1000 mg/l (48 h)	(Lauscha Fiber International GmbH)
Algentox	OECD Guideline 201	EC50 > 1000 mg/l (72 h)	(Lauscha Fiber International GmbH)
Bakterientox	OECD Guideline 209	-	

Quelle: Eigene Zusammenstellung, KIT-ITC, nach Sicherheitsdatenblättern für kommerzielle Glasfasern.

3.5.8 Ökotoxizität der Matrixmaterialien Polyester, Polyurethan und Epoxidharze

Die wichtigsten in WEA-Rotorblättern zum Einsatz kommenden Matrixmaterialien, die im folgenden bezüglich ihrer Ökotoxizität betrachtet werden, sind Polyester (PE), Polyurethan (PU) und Epoxidharze (EPH).

Für kommerzielle Expoxidharze stehen in den Sicherheitsdatenblättern teilweise Aussagen zur aquatischen Toxizität zur Verfügung (Tabelle 31), wobei die Einordnung je nach Hersteller und Produkt zwischen WGK 1 und 2 variiert. Kritisch zu betrachten ist, inwieweit diese Angaben auf das ausgehärtete Produkt zutreffen.

Tabelle 31: Ökotoxikologische Werte für kommerzielle Epoxidharze.

Testmethode	Richtlinie	Werte für Epoxidharze	Quelle
Akuter Fischtoxizitätstest	OECD Guideline 203,	LC50 4,4 mg/l (96h, statisch)	(Conrad Electronic SE)
Akuter Daphnientest	OECD Guideline 202,	EC50 2,8 mg/l (48 h)	(Conrad Electronic SE)
Algentox	OECD Guideline 201,	EC50 9,4 mg/l (72 h)	(Conrad Electronic SE)
Bakterientox	OECD Guideline 209	> 1000 mg/l (3h)	(Conrad Electronic SE)

Quelle: Eigene Zusammenstellung, KIT-ITC, nach Sicherheitsdatenblättern für kommerzielle Epoxidharze.

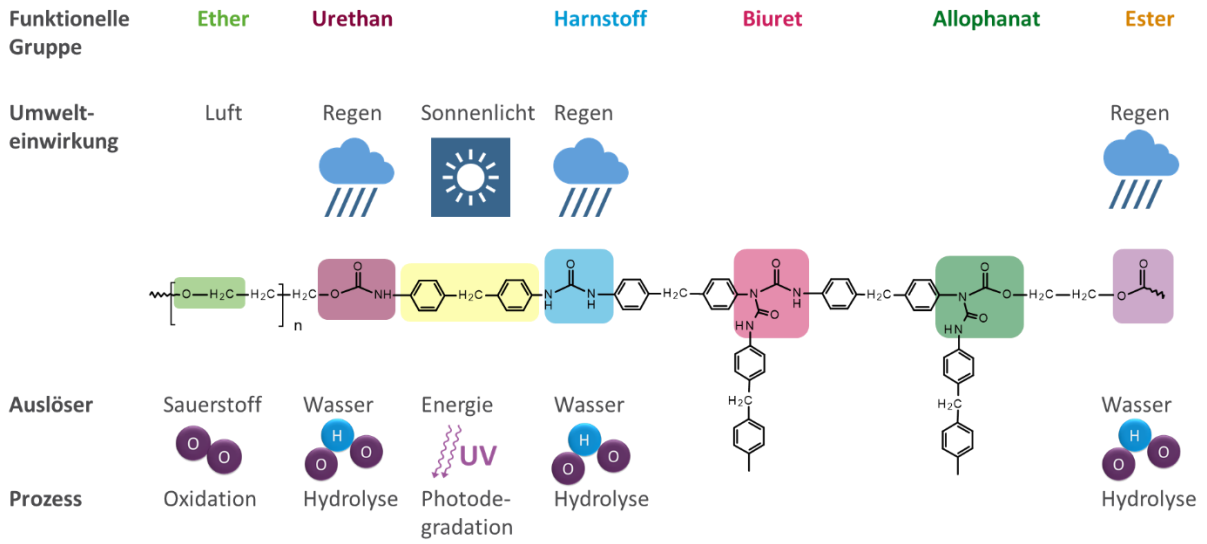
3.5.8.1 Polyurethane

Polyurethan ist sowohl als Matrix- als auch als Sandwichmaterial (in Schaumform) in Rotorblättern enthalten. Beim Zersägen der Rotorblätter am Aufstellungsort kann es daher zu einer Freisetzung von Partikeln aus PU in die Umwelt kommen, die dann als Feststoffpartikel in die Luft, in den Boden oder das Wasser eingetragen werden können.

Polyurethanschäume, die in der Umwelt der UV-Einstrahlung, starken Temperaturschwankungen und dem Angriff durch Regenwasser ausgesetzt sind, können im Laufe der Zeit angegriffen und auch durch Mikroorganismen geschädigt werden. Dabei werden

die aromatischen Bestandteile im PU durch Sonnenlicht und Sauerstoff schneller abgebaut, während Partikel im Boden durch enzymatische Prozesse schwerer abgebaut werden. Generell gilt, dass Struktur, Oberflächenladung, Additive und die Umweltbedingungen entscheidend sind für das Verhalten der PU. Die verschiedenen möglichen Prozesse die unter den Umwelteinwirkungen ablaufen können sind anhand der chemischen Struktur von PU in Abbildung 100 schematisch zusammengefasst. Dabei entstehen Fragmente aus den PU, die niedermolekulare Verbindungen und Oligomere darstellen (Skleničková et al. 2020).

Abbildung 100: Abbauprozesse an Polyurethanen in der Umwelt.



Quelle: Eigene Darstellung, KIT-ITC, nach Skleničková et al. (2020).

Durch die Zersetzung können toxische Stoffe wie Diethylenglycol entstehen und sich über Diffusion im Boden verbreiten. Negative Wirkungen von Abbauprodukten wurden zum Beispiel auf Samen bzw. auf Jungpflanzen beobachtet (Skleničková et al. 2020).

Die am meisten verbreiteten herkömmlichen PUF auf Basis von aromatischen Polyisocyanaten und Polyetherpolyolen sind gegen biologischen Abbau einigermaßen resistent, während sie anfällig für photooxidativen Abbau anfällig sind, der über Photo-Fries und Kettenspaltungsreaktionen erfolgt. Im Gegensatz dazu sind die Polyester-PUF anfälliger für enzymatische Hydrolyse als Polyether-PUF. Von Polyurethan-Elastomeren ist bekannt, dass sie dass die Vernetzung, die Bildung von Hartsegmenten und die hohe Kristallinität die Widerstand gegen hydrolytischen und enzymatischen Abbau erhöhen. Man würde erwarten, dass die gleichen Beziehungen für PUF gelten. Allerdings ist die Beziehung zwischen biologischem Abbau und Struktur-Eigenschaft Beziehung zwischen Biodegradation und Struktur-Eigenschaft bei PUF eher begrenzt und im Vergleich zu PU und sollte in Zukunft weiter untersucht werden, da die Mechanismen der enzymatischen Hydrolyse/Biodegradation von PUF noch nicht noch nicht vollständig verstanden sind.

3.5.9 Zusammenfassung zu den ökotoxikologischen Informationen

Für alle hier angegebenen Daten gilt, dass die ökotoxikologischen Standardtestsysteme vor allem für lösliche organische Substanzen entwickelt wurden. Die beim Rückbau und der Verwertung freiwerdenden Stäube und Fasern sind aber im Allgemeinen feste, unlösliche Stoffe (CF, GK, die ausgehärteten Kompositmaterialien Epoxidharz und PU). Es ist ungeklärt, ob diese

Standardtestverfahren geeignet sind, um die Gefährdung für die Umwelt damit zu beschreiben. Daher sind hier noch Fragen an die Forschung und regulierenden Institutionen offen:

- Wie verhalten sich die ausgehärteten Kunststoffe (Expoxidharze) tatsächlich in der Umwelt? Hier müsste eine Betrachtung über den Eintrag von Mikroplastik in die Umwelt durchgeführt werden, was nicht Gegenstand dieses Berichts ist.
- Wie verhalten sich faserförmige unlösliche Materialien in der Umwelt? Sind die vorliegenden Testsysteme anwendbar und ausreichend?

3.6 Beurteilung der Rückbauprozesse

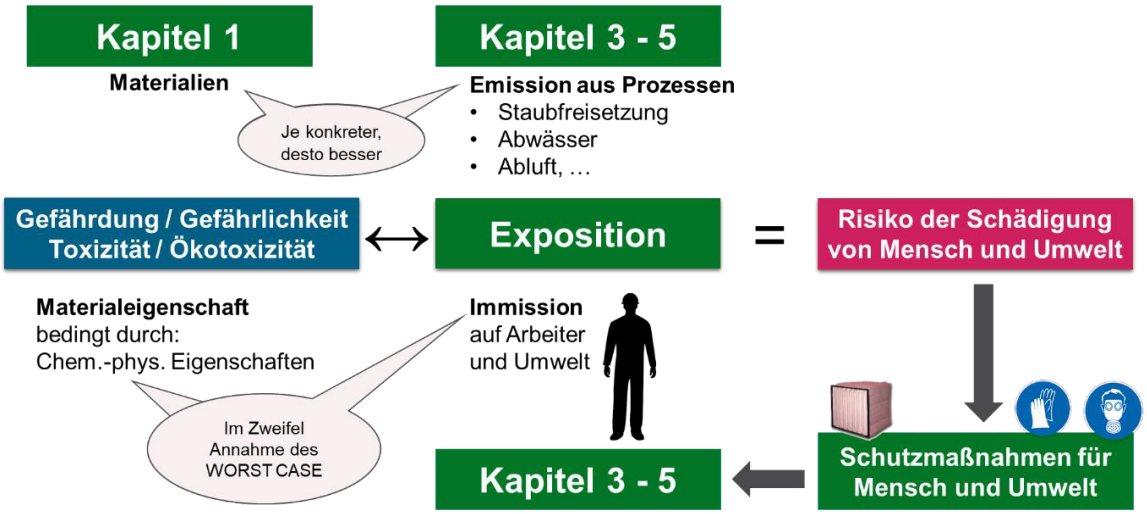
Ziel der in diesem Kapitel durchgeführten Betrachtungen ist die nachgeschaltete Risikobeurteilung der in den Folgekapiteln diskutierten Prozesse. Hierfür wurden folgende Aspekte und Materialien betrachtet, die im Projektverlauf zur detaillierten Auswertung herangezogen werden:

- Identifikation der in Rotorblättern eingesetzte Materialien nach Kapitel 2
- Prüfung der Datenlage zu Grenzwerten, Richtlinien und Sicherheitsdatenblättern der identifizierten Materialien
- Toxizität und Ökotoxizität identifizierter Materialien für die keine ausreichenden Daten zum Arbeits- und Umweltschutz ermittelt wurden.

Zur Beurteilung des Risikos für Mensch und Umwelt bei den betrachteten Prozessen der Vorortzerkleinerung, Aufbereitung und Verwertung von Rotorblattabfällen sowie zur Ableitung der gewünschten Handlungsempfehlungen für eine Risikominderung ist neben der Kenntnis zur Gefährdung durch die Materialien auch die Beschreibung der Exposition notwendig (Abbildung 101). Dies heißt konkret es bedarf

- Freisetzungsszenarien von Fasern und Stäuben beim Rückbau und der Verwertung von Rotorblättern
- Konzentration und Verteilung von Fasern und Stäuben beim Rückbau und der Verwertung von Rotorblättern

Abbildung 101: Risikoabschätzung basierend auf den Daten zur Gefährlichkeit und der Exposition.



Quelle: Eigene Darstellung, KIT-ITC.

Zur Risikobeurteilung stellen sich bezüglich der Freisetzungsszenarien folgende Fragen:

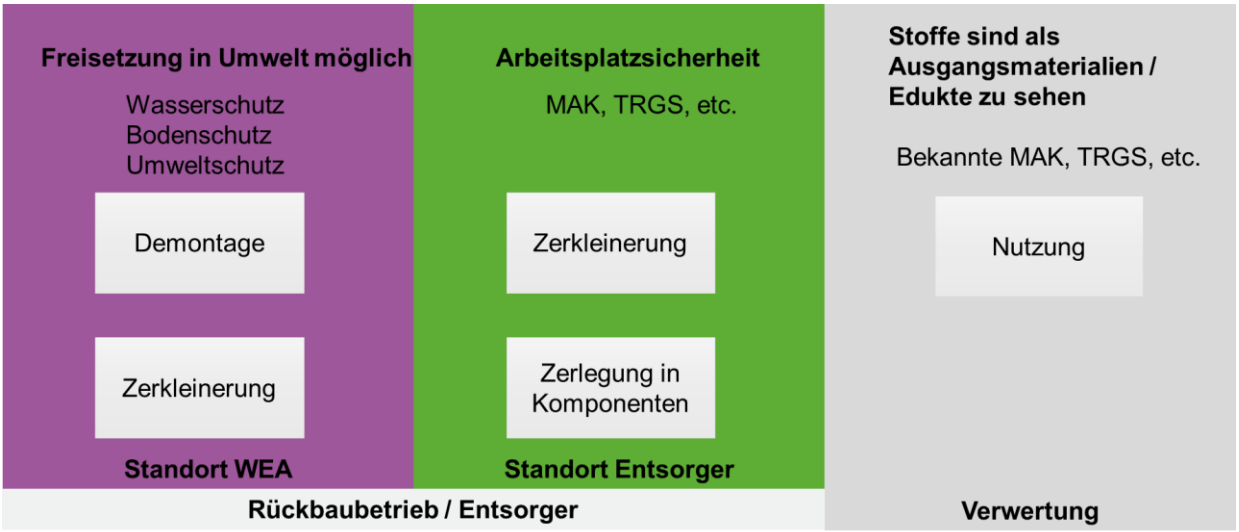
- Wie sehen die Freisetzungsszenarien aus?
- Wie werden die Rotorblätter geschnitten/getrennt? Werden Fasern und Stäube in die Luft freigesetzt?
- Wird beim Schneidprozess mit Wasser gespült und wenn ja, wird das Spülwasser aufgefangen und gereinigt?
- Mit welcher Exposition ist zu rechnen? Art und Konzentration der Exposition?

Dabei spielen Daten zur realen Freisetzung eine wichtige Rolle, damit Maßnahmen abgeleitet werden können. Eine wichtige Rolle zur Erfassung der Freisetzung nimmt hier die Messtechnik ein, die aktuell standardmäßig auf probenehmenden Verfahren mit mikroskopischer Auswertung nach VDI-Richtlinie 3861 - 2 oder NIOSH Manual of Analytical Methods (NMAM) 7400 beruht.

Aus Sicht der Beurteilung bezüglich der Zusammenhänge von Standort, Prozess und den dort auftretenden Expositionen und den biologischen Wirkungen, kann der Gesamtprozess in die folgenden drei Standorte gegliedert werden, an denen dann die entsprechenden Prozesse wie die Zerkleinerung oder Demontage durchgeführt werden (Abbildung 102).

- Standort der Windenergieanlage: An diesem Standort greifen neben dem Arbeitsschutz für die ausführenden Arbeiter auch die Betrachtungen zum Umwelt- und Naturschutz.
- Standort des Entsorgungsfachbetriebs: Da diese Prozesse an zugelassenen und überwachten Firmenstandorten durchgeführt werden, die von Haus aus entsprechende Schutzmaßnahmen für Umwelt- und Naturschutz installiert haben müssen, liegt hier der Fokus auf dem Arbeitsschutz für Prozesse und Methoden, die auf neue Materialien wie die Carbonfasern angewendet werden sollen.
- Standort des Verwerters: Ein Verwerter erhält bzw. erwirbt und verarbeitet die Materialien, die der Entsorger aus den Rotorblättern gewonnen hat. Im Normalfall handelt es sich dabei um definierte Materialien bzw. Produkte, für die chemische und physikalische Daten- und damit auch Sicherheitsdatenblätter vorliegen müssen. Damit sind die Umgangsbedingungen klar definiert und vergleichbar zu denen in der Produktion der Materialien. Eine zusätzliche Betrachtung von Umweltschutz und Arbeitsplatzsicherheit entfällt hiermit als nicht notwendig. Gegebenenfalls stellen Prozesse Ausnahmen, in denen die Materialien einer bisher unbekannten Verwendung zugeführt werden, dar, zum Beispiel die Einbringung von CF- oder CFK-Resten in Prozesse, wie zum Beispiel Schmelzöfen in der Metallindustrie.

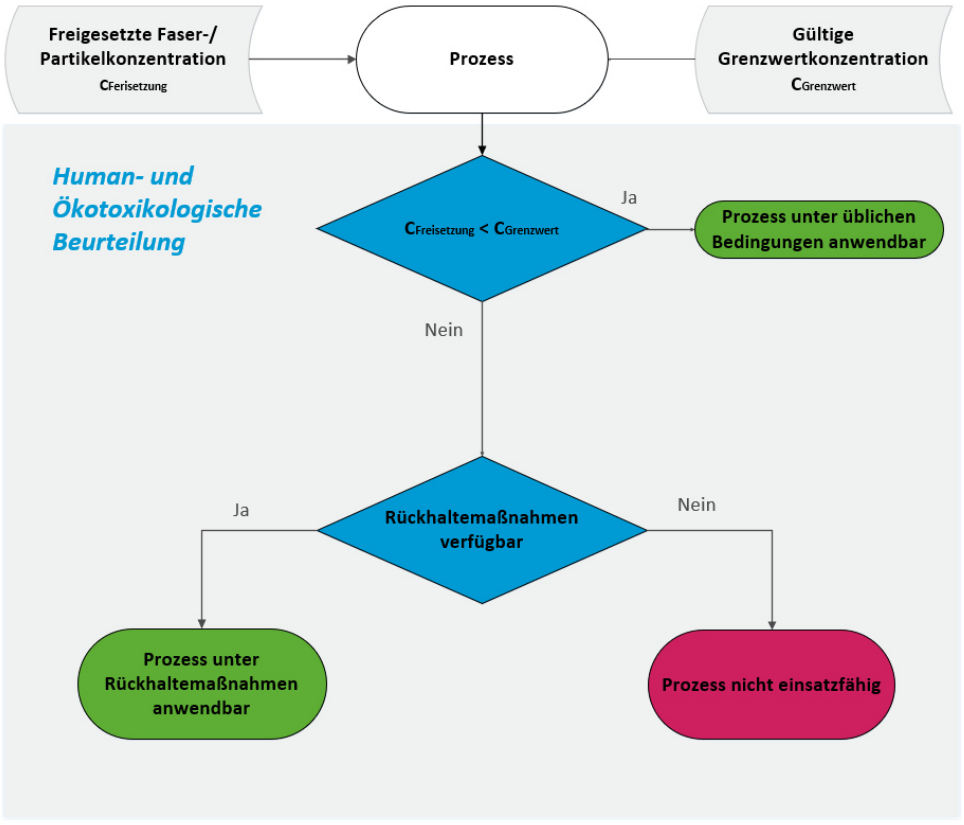
Abbildung 102: Prozesskette für den Rückbau von Windenergieanlagen und der Verwertung der demontierten Rotorblätter.



Quelle: Eigene Darstellung, KIT-ITC.

Genauer zu betrachtende Prozesse an den Standorten der Windenergieanlage sowie beim Entsorger werden nach dem Beurteilungsschema wie in Abbildung 103 betrachtet: die Konzentrationen potentieller Schadstoffe werden mit den identifizierten Grenzwerten verglichen.

Abbildung 103: Beurteilungsschema für Prozesse zur Bearbeitung der Rotorblätter.



Quelle: Eigene Darstellung, KIT-ITC.

Werden die jeweils an dem betrachteten Prozess vorliegenden bzw. herangezogenen Grenzwerte zum Schutz von Umwelt oder exponiertem Arbeiter eingehalten, so ist der Prozess unter seinen üblichen Bedingungen anwendbar. Überschreiten die Konzentrationen voraussichtlich die erlaubten Werte, so ist der Einsatz von Rückhaltemaßnahmen zu prüfen und gegebenenfalls vorzuschreiben. Stehen solche Rückhaltemaßnahmen nicht zur Verfügung, wird dieser Prozess für den Rückbau der Rotorblätter aus Windenergieanlagen als nicht geeignet eingestuft. Dabei darf die kritische Betrachtung der Eignung von Grenzwerten für die betrachteten Fasern oder anderen neuen Materialien nicht vernachlässigt werden.

3.6.1 Vorhandene Arbeitsplatzmessungen: MEGA-Daten

Seit 1972 führt das Institut für Arbeitsschutz (IFA) der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (DGUV) die Datenbank "Messdaten zur Exposition gegenüber Gefahrstoffen am Arbeitsplatz", kurz MEGA. In MEGA werden die im Messsystem Gefährdungsermittlung der UVT – MGU ermittelten Expositionsdaten zu Luftmessungen und Materialproben erfasst und ausgewertet, dazu auch Angaben zu weiteren Daten wie:

- Informationen zum betrieblichen Arbeitsbereich
- Informationen zum Arbeitsablauf und den Produktionsverfahren
- Daten zu den Einsatzstoffen
- Daten zu den Schutzmaßnahmen
- Daten zur Expositionssituation
- sowie zu den Bedingungen der Probenahme und der verwendeten Analytik.

Auch rückwirkende Daten werden aus Archiven nacherfasst, sodass in einigen Bereichen Messwerte seit 1961 vorliegen; seit 1998 werden auch Biostoffe erfasst. Die Datensätze werden den am Messnetz teilnehmenden Unfallversicherungsträgern zum Zweck der Vorsorge zur Verfügung gestellt. Darüber hinaus können die Daten epidemiologisch sowie im Rahmen von Ermittlungen im Zusammenhang mit angezeigten stoffbedingten Berufskrankheiten ausgewertet werden. Eine weitere Anwendung finden die Daten in der Validierung und Kalibrierung von Software-Tools zur Abschätzung der Expositionshöhe wie dem GESTIS-Stoffenmanager®. Beim GESTIS-Stoffenmanager handelt es sich um ein Online-Tool, das vom IFA unter https://gestis.stoffenmanager.com/ angeboten wird. Es wird unter anderem in der TRGS 400 als geeignete Informationsquelle bei der Erstellung von Gefährdungsbeurteilungen empfohlen. Eine weitere Funktion der Software ist die Durchführung quantitativer Expositionsabschätzungen, bei denen als nicht-messtechnische Alternative eine quantitative Abschätzung der inhalativen Exposition in mg/m³ analog TRGS 402 (Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA)) durchgeführt wird. Das zugrundeliegende Expositionsmodell "Stoffenmanager®" ist durch die EU im Technischen Leitfaden der REACH-Verordnung EG Nr. 1907/2006 (Europäische Kommission 30.05.2008) als "Tier 1+"-Modell anerkannt.

Die DGUV hat eine vorläufige Auswertung der MEGA-Messdaten in Form von Tabellen zur arbeitsbedingten Exposition gegenüber der einatembaren und der alveolengängigen Staubfraktion veröffentlicht (Arnone 2018).

Unter Anwendung der TRGS 402 wurde die inhalative Exposition mit personengetragenen Probenahmesystemen direkt an der Person bestimmt. Ermittelt wurden die einatembare Staubfraktion (E-Staub) und die alveolengängige Staubfraktion (A-Staub). Mit stationär

aufgestellten Probenahmesystemen wurde in Atemhöhe und unmittelbarer Nähe der beschäftigten Person sowie am Ort höheren Risikos direkt an der Emissionsquelle gemessen; die berichteten Messwerte werden als Schichtmittelwerte aus Mittelung der Messung über die gesamte Expositionsdauer während einer Schicht angegeben.

Aus der umfangreichen Liste an untersuchten Arbeitsplätzen mit unterschiedlichsten Tätigkeiten und Produkten sind für die durchgeführte Betrachtungen folgende Informationen relevant:

- Glasfasern, Mineralfasern, Herstellung und Verarbeitung
- Faserverstärkte Kunststoffe, Herstellung und Verarbeitung
  - Glasfaserverstärkte Kunststoffe, Herstellung
  - Carbonfaserverstärkte Kunststoffe, Herstellung
  - Carbonfaserverstärkte Kunststoffe, Verarbeitung.

Weitere Prozesse, die in den folgenden Kapiteln gegebenenfalls von Interesse sein können, sind beispielsweise:

- Herstellung von Zement und Kalk
- Recycling (Glas, Papier, Kunststoff, Verpackungsmaterial)
- Baustoffrecycling- und Sortieranlagen
- Metallrecycling.

Es gibt einige grundlegende Schwierigkeiten bei der Nutzung der Daten zum Beispiel von Arbeitsplätzen für die Herstellung und Verarbeitung von Glas- und anderen Mineralfasern für die Betrachtungen der Vorortzerkleinerung, Aufbereitung und Verwertung von Rotorblattabfällen: zum einen werden Glas- und Mineralfasern zusammengefasst. Da keine weiteren Informationen zu den Arbeitsplätzen vorliegen, kann angenommen werden, dass es sich um ungerichtete, dünne Fasern für Dämmwollen und nicht um die Verstärkungsmaterialien für Verbundwerkstoffe handelt (Tabelle 32). Zum zweiten werden die Expositionswerte als A- und E-Staub in Massenkonzentrationen (in mg/m^3) angegeben, während für Fasern die Anzahlkonzentration (#/m^3) entscheidend ist.

Tabelle 32: MEGA-Daten für Arbeitsplätze zur Herstellung und Verarbeitung von Glasfasern und Mineralfasern.

Staub-fraktion	Probe-nahme Dauer	Probe-nahme Art	Anteil MW ≤ GW	Anteil MW > GW	Konz. [mg/m³] 50-%-Wert	Konz. [mg/m³] 90-%-Wert	Konz. [mg/m³] 95-%-Wert
E-Staub	t ≥ 2 h	stationär	98,2	1,8	0,56	4,132	6,154
	t < 2 h	stationär	91,7	8,3	0,78	6,374	23,612
	t ≥ 2 h	An der Person	94,9	5,1	1,55	6,132	8,396

Staub-fraktion	Probe-nahme Dauer	Probe-nahme Art	Anteil MW ≤ GW	Anteil MW > GW	Konz. [mg/m³] 50-%-Wert	Konz. [mg/m³] 90-%-Wert	Konz. [mg/m³] 95-%-Wert
A-Staub	t ≥ 2 h	stationär	97,3	2,7	NWG	0,5	0,823
	t < 2 h	stationär	54,5	40,9	0,9	4,694	6,463
	t ≥ 2 h	An der Person	89,7	10,3	0,29	1,07	1,782

Quelle: Eigene Zusammenstellung, KIT-ITC, nach Arnone (2018).

Dieses Problem tritt auch bei dem relevantesten Arbeitsplatz, dem spanenden Bearbeiten von faserverstärkten Kunststoffen (Tabelle 33) auf.

Tabelle 33: MEGA-Daten für Arbeitsplätze mit spanenden Bearbeitungsverfahren in der Herstellung und Verarbeitung Faserverstärkte Kunststoffe.

Staub-fraktion	Probe-nahme Dauer	Probe-nahme Art	Anteil MW ≤ GW	Anteil MW > GW	Konz. [mg/m³] 50-%-Wert	Konz. [mg/m³] 90-%-Wert	Konz. [mg/m³] 95-%-Wert
E-Staub	t ≥ 2 h	stationär	100	0	NWG	1,585	1,69
	t ≥ 2 h	An der Person	85	15	0,53	38,3	53
	t < 2 h	An der Person	66,7	33,3	3,7	26,62	44,48
A-Staub	t ≥ 2 h	An der Person	82,9	17,1	NWG	3,23	5,848

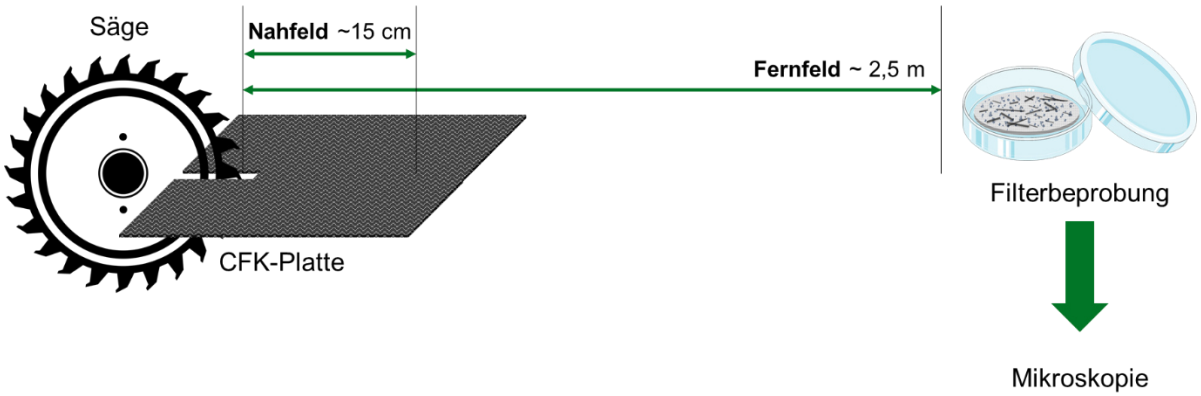
Quelle: Eigene Zusammenstellung, KIT-ITC, nach Arnone (2018).

Dennoch gilt festzuhalten, dass gerade an der exponierten Person relevante Konzentrationen von einatembaren Stäuben gemessen wurden, sodass Schutzmaßnahmen auf jeden Fall getroffen werden müssen.

3.6.2 Vorhandene Arbeitsplatzmessungen: CarboBreak-Daten; die mechanische Bearbeitung von CFK mittels Sägeprozess

Im Rahmen des BMBF-Projekts CarboBreak wurden durch Bäger et al. (2019) Messungen zur Freisetzung von Fasern aus einer CFK-Platte während eines Sägeprozesses durchgeführt.

Abbildung 104: Versuchscharakterisik bei der Fasermessung an einer Säge zur Trennung von CFK-Platten.



Quelle: Eigene Darstellung, KIT-ITC, nach Bäger et al. (2019).

Ein Schema des Experiments ist in Abbildung 104 dargestellt: eine Verbundmaterialplatte aus Epoxidharz als Matrix mit eingebetteten UHM-Carbonfasern (E-Modul 640 GPa, Bruchdehnung 0,4 % und Faserdurchmesser 10 µm) wurde mit einer Bandsäge zersägt. Die Bandsäge war mit einem diamantbesetzten Band ausgerüstet und wurde in trockener Schnittführung betrieben. Dabei wurden im direkten Umfeld der Säge, dem sogenannten Nahfeld mit nur ca. 15 cm Abstand sowie in 2,5 m Entfernung, dem sogenannten Fernfeld, jeweils Filter beprobt und diese im Anschluss mittels Rasterelektronenmikroskopie und Bildanalyse ausgewertet.

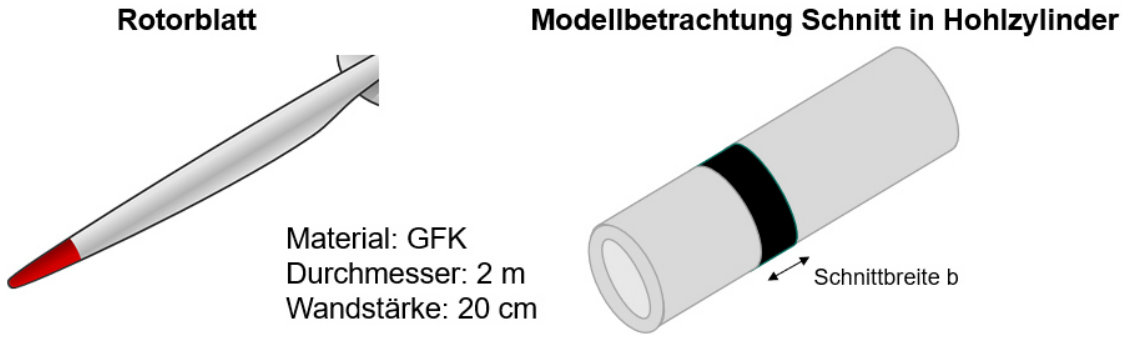
Es wurden insbesondere im Nahfeld hohe Konzentrationen $c_{N,NF}$ = 832 519 F/m^3 (95%-Bereich: 980 137 F/m^3) beobachtet, aber auch im Fernfeld wurden signifikante Konzentrationen an freigesetzten Fasern ermittelt von $c_{N,FF}$ = 33 372 F/m^3 (95%-Bereich: 61 372 F/m^3). Dies sind Konzentrationen, die ebenfalls hoch sind und Rückhaltemaßnahmen bedingen.

Allerdings wurde in dem vorliegenden Fall eine CFK-Platte mit Carbonfasern auf PECH-Basis verwendet, die zum Splitterbruch bei mechanischer Bearbeitung neigen können (Bäger et al. (2019). Auf Basis der Untersuchungen innerhalb dieses Projekts und Abschätzungen von Experten kann eine Verwendung von PECH-Fasern in Rotorblättern mit großer Wahrscheinlichkeit ausgeschlossen werden. Wichtig ist es vor diesem Hintergrund, dass ähnliche Versuche mit HT-Carbonfasern auf PAN-Basis im Rahmen von CarboBreak durchgeführt wurden. Hier wurde gezeigt, dass auch PAN-basierte Carbonfasern unter mechanischer Belastung WHO-Fasern freisetzen und an entsprechenden Arbeitsplätzen signifikante Konzentrationen nachgewiesen werden können (Große et al. 2021).

3.6.3 Theoretische Abschätzung für Trennung von CFK/GFK

Da Daten zur Partikel- und Faserfreisetzung bei den betrachteten Prozessen in vielen Fällen nicht vorliegen, wird eine einfache Freisetzungsbetrachtung für den Fall des Sägens an einem Rotorblatt durchgeführt. Als Ansatz dient das Vorbild von Jan Hechler (2019), der das Rotorblatt mit einem Hohlzylinder der Wandstärke 20 cm annähert. Der Modellansatz nimmt an, dass beim Trennen das Material aus dem Schnitt einer Breite b (Abbildung 105 schwarzer Bereich) vollständig in Form von Partikeln freigesetzt wird.

Abbildung 105: Modellbetrachtung zur Materialfreisetzung beim Schneiden der GFK-Hülle eines WEA-Rotorblatts.



Quelle: Eigene Darstellung, KIT-ITC.

Über die Berechnung des beim Schnitt in Späne und Partikel zerkleinerten Volumens wurden unter Berücksichtigung der Materialdichte Massen von 0,9 bzw. 11 kg für Wasserstrahlschneiden bzw. eine Seilsäge ermittelt.

Tabelle 34: Abschätzung einer Faserzahl beim Trennen der Faserverbundwerkstoffhülle eines Rotorblatts.

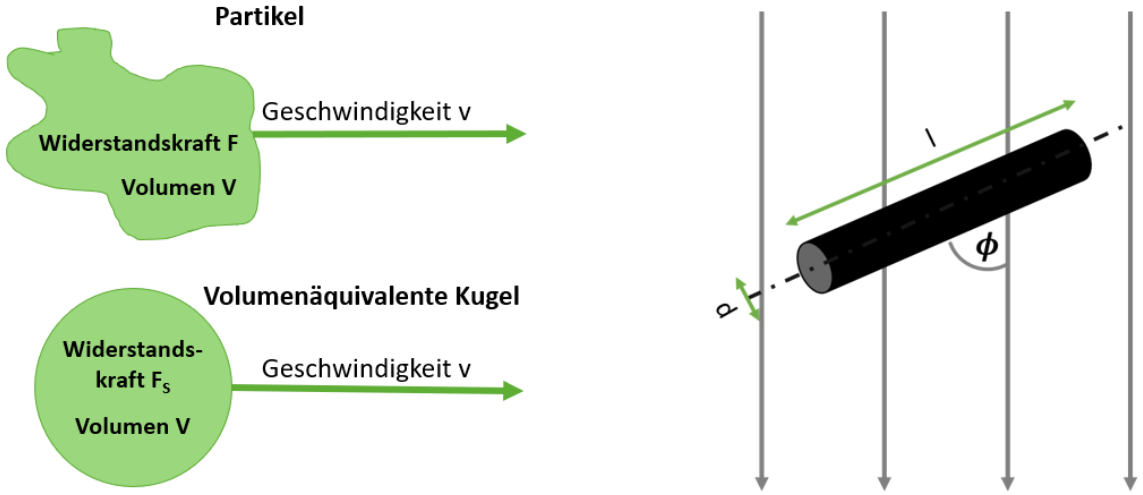
Schneid-verfahren	Freigesetzte Partikelmasse	CF-Anteil	CF-Länge	100µm-Faserstücke
Seilsäge	11 kg	5,5 kg	80.000 km	$8 * 10^{11}$
Wasserstrahl-schneiden	0,9 kg	450 g	6.500 km	$6,5 * 10^{10}$

Quelle: Eigene Darstellung, KIT-ITC.

Mit einem angenommenen Faserfüllgrad von 50 % lassen sich die CF-Massen in eine Gesamtfaserlänge umrechnen. Da die „Sägespäne“ und Partikeln entsprechend kurz bzw. klein sind, lassen sich für die Zahl der freigesetzten Faserbruchstücke Anzahlen von $6,5 * 10^{10}$ bzw. sogar $8 * 10^{12}$ berechnen.

Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Annahme einer Faserbruchstücklänge von 100 µm durchaus Relevanz besitzt. Das Verhalten der Fasern in der Luft wird durch seine aerodynamischen Eigenschaften bestimmt, so wie auch die Arbeitsplatzmesswerte A- und E-Staub durch eine aerodynamische Klassierung beprobt werden. Um das aerodynamische Verhalten einer Faser beschreiben zu können, wird diese als zylindrisches Partikel aufgefasst und ein aerodynamischer Äquivalentdurchmesser berechnet, der dem eines kugelförmigen Partikels mit dem gleichen Verhalten entspricht (Abbildung 106). Zur Berechnung dieses Äquivalentdurchmessers wird die Geometrie über das Aspektverhältnis β beschrieben. Die veränderte Widerstandskraft des nicht kugelförmigen Partikels wird mit dem dynamischen Formfaktor X beschrieben (Baron und Willeke 2001).

Abbildung 106: Widerstandskräfte an unregelmäßig geformten Partikeln und Fasern im Vergleich zum kugelförmigen Partikel.



Quelle: Eigene Darstellung, KIT-ITC, nach Hinds (1999).

Das Aspektverhältnis ist definiert als Verhältnis von Länge zu Durchmesser der Faser:

$$\beta = \frac{Länge\ l_F}{Durchmesser\ d_F}$$

Der dynamische Formfaktor beschreibt das Verhältnis der Kräfte im Strömungsfeld zwischen komplexerer Geometrie, in diesem Fall der Faser im Vergleich zum idealen Partikel in Kugelform:

$$\chi = \frac{F_{Faser}}{F_{Kugel}}$$

Der Formfaktor X für eine im Strömungsfeld ausgerichtete Faser kann für die zwei Extrembedingungen parallele (Index ∥) und senkrechte (Index ⊥) Ausrichtung zur Strömung jeweils berechnet werden mit:

$$\chi^{\parallel} = {}^{4}/_{3}\,(\beta^2 - 1)/\left\{\frac{2\beta^2 - 1}{\sqrt{\beta^2 - 1}} \cdot ln\left[\beta + \sqrt{\beta^2 - 1}\right] - \beta\right\}$$

und

$$\chi^{\perp} = {}^{8}/_{3}\,(\beta^2 - 1)/\left\{\frac{2\beta^2 - 3}{\sqrt{\beta^2 - 1}} \cdot ln\left[\beta + \sqrt{\beta^2 - 1}\right] + \beta\right\}$$

Bei sehr geringen Strömungsgeschwindigkeiten bzw. kleinen Reynoldszahlen Re < 0,1 kann aus den Extremen für einen beliebigen Winkel θ der dynamische Formfaktor wie folgt berechnet werden:

$$\frac{1}{\chi_\theta} = \frac{1}{3}\left(\frac{1}{\chi_\perp} - \frac{1}{\chi_\parallel}\right)$$

Die Berechnung des aerodynamischen Äquivalentdurchmessers erfolgt nach den Betrachtungen von Fuchs (1964).

$$d_{ae} = d_F \sqrt{\frac{\delta_F \, \beta}{\delta_0 \, \chi}}$$

Darin ist ρ_F die Faserdichte und ρ_0 die Einheitsdichte von 1 g/cm^3. Nach dieser Berechnungsmethode sind in die aerodynamischen Äquivalentdurchmesser für eine typische Carbonfaser der Dichte ρ_F = 1,8 g/cm^3 und einem Faserdurchmesser von d_F = 7 µm gegenüber unterschiedlichen Längen aufgetragen.

Tabelle 35: Aerodynamischer Äquivalentdurchmesser d_{ae} von Carbonfasern unterschiedlicher Längen l_F bei einem typischen Durchmesser von d_F = 7 µm und einer Materialdichte von ρ_F = 1,8 g/cm³.

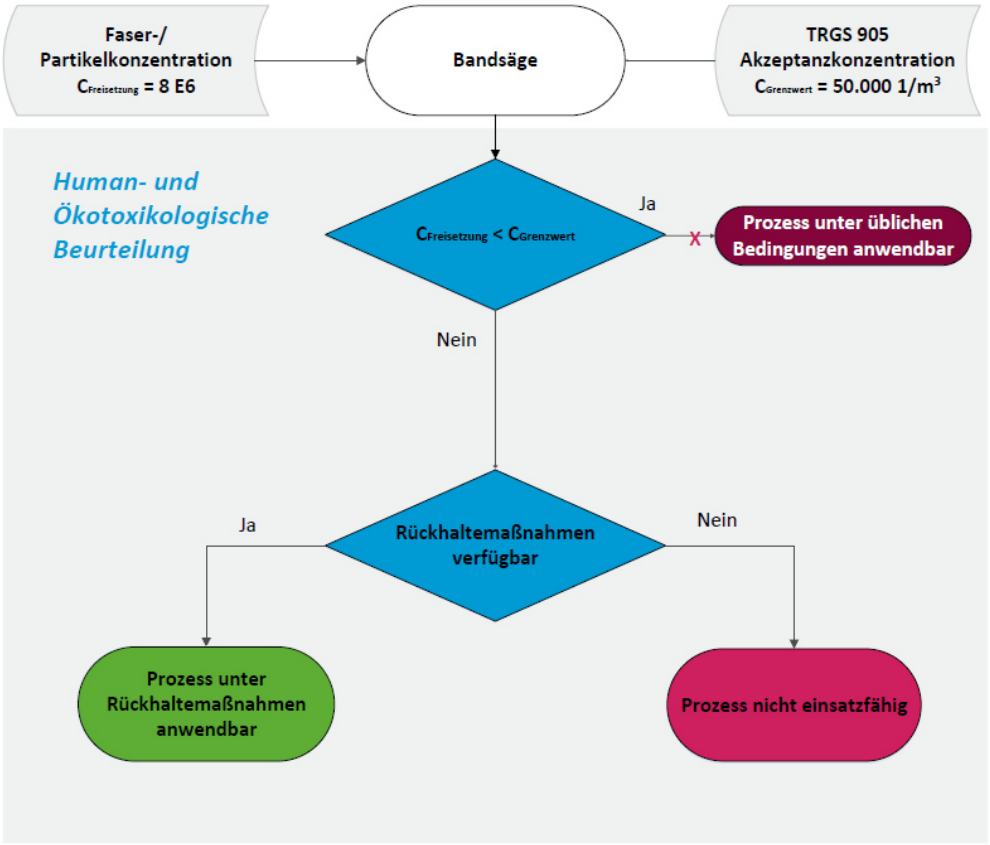
Faserlänge l_F	Aspektverhältnis $\beta = l/d$	Aerodynamischer Äquivalentdurchmesser d_{ae}
14 µm	2	11,6 µm
21 µm	3	12,8 µm
35 µm	5	14,3 µm
50 µm	7,14	15,3 µm
100 µm	14,3	17,1 µm

Quelle: Eigene Zusammenstellung, KIT-ITC.

Diese Berechnungsmethode wurde von Liu et al. (1983) mit Messungen von Carbonfasern in der Aerosolphase verglichen und eine gute Anwendbarkeit dokumentiert. Es wird deutlich, dass der für das Inhalationsverhalten maßgebliche aerodynamische Durchmesser sehr viel kleiner ausfällt, als die Faserlängen vermuten lassen. Damit sind auch längere Faserfragmente bzw. gröbere Sägestäube nicht einfach zu vernachlässigen.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass es nicht sichergestellt ist, dass die Emissionen an Fasern und Stäuben unter den herangezogenen Grenzwerten bleiben. In der Anwendung des Beurteilungsschemas auf die Bandsäge führt dies in Kombination mit dem Wissen um die Unsicherheiten bei den Einzelkomponenten (Matrixmaterial nicht bioabbaubar aber ggfs. ökotoxisch, Kanzerogenität von ist CF nicht abschließend geklärt) dazu, dass die Bandsäge nur unter geeigneten Rückhaltemaßnahmen zum Einsatz kommen sollte (Abbildung 107). Dies bedeutet konkret die Empfehlung einer Einhausung, gekoppelt mit einer Wasserspülung, deren Abwässer aufgefangen und einer entsprechenden Aufbereitung zugeführt werden.

Abbildung 107: Anwendung des Beurteilungschemas auf den Prozess der Bandsäge zur Zerlegung von Rotorblättern.



Quelle: Eigene Darstellung, KIT-ITC.

3.7 Zusammenfassung

Zusammenfassend lässt sich für die Betrachtung der bei den Prozessen des Rückbaus und der Verwertung von Rotorblättern potentiell freiwerdenden Stäube und Fasern Folgendes feststellen:

- Für Carbonfasern fehlen rechtlich bindende Grenzwerte für die Emission an Arbeitsplätzen oder in die Umwelt. Im Rahmen der BMBF-Projekte CarboBreak und CFC – CarbonFibreCycle werden bei entsprechender Bearbeitung von CF/CFK eine Freisetzung von Faserfragmenten mit WHO-Geometrie beobachtet. Die Veröffentlichungen zu ermittelten Konzentrationen an WHO-Fasern an Arbeitsplätzen in Abhängigkeit der Zerkleinerung von carbonfaserhaltigen Verbundwerkstoffen werden in 2022 erwartet.
- Ältere Studien haben keine eindeutigen Hinweise auf kanzerogene Wirkung von WHO-Carbonfasern festgestellt. Allerdings werden Overload-Bedingungen als kritisch eingeschätzt. Die bestätigte hohe Biopersistenz der Fasern macht Untersuchungen zur langfristigen Wirkung erforderlich.
- Im Rahmen der toxikologischen Tests des CFC – CarbonFibreCycle -Projekts werden in humanen Lungenzellen, die Carbonfasern mit WHO-Geometrie exponiert wurden, inflammatorische Wirkung sowie stressinduzierte Genregulierung beobachtet. Auch die Publikation dieser Daten ist für 2022 vorgesehen.

- In Rotorblättern ist eine Vielzahl Materialien mit unzureichender Datenbasis zur toxikologischen Wirkung verbaut. Konkretes Beispiel sind die Glasfasern, die je nach Art (z. Bsp. E- und ECR-Glas, Faserdurchmesser) als kanzerogen eingestuft werden oder auch nicht. Da aber auch hier bei der Bearbeitung kritische Faserfragmente mit WHO-Geometrie freigesetzt werden können, ist nach dem Fürsorgeprinzip hier immer der gefährlichere Fall anzunehmen.
- Insbesondere für die Demontage-Prozesse am Standort der WEA fehlen Werte zur Freisetzung von inhalierbaren Stäuben und Fasern, Gleiches gilt aber auch für die Zerkleinerung beim Aufbereiter.
- Für eine abschließende Beurteilung sind folgende Fragen forschungsseitig zu klären:
  - Welche Partikel- und Faserkonzentrationen werden bei den verschiedenen Bearbeitungsprozessen freigesetzt?
  - Welche Biopersistenz bzw. Löslichkeiten haben Carbonfasern in der Lunge? Welche gesundheitlichen Folgen können nach der Inhalation von CF mit WHO-Fasergeometrie auftreten?
  - Wie verhalten sich Faserfragmente in der Umwelt? Wie wirkt es sich auf die Umwelt (Boden, Wasser, Luft) aus, dass CF in der Umwelt inert sind? Kommt es zur Anreicherung in der Umwelt bzw. bestimmten Lebewesen (Bioaakumulation)? Wenn ja, mit welchen Folgen?
- Für eine Bewertung notwendiger Messungen freigesetzter Fasern an Arbeitsplätzen und in der Umwelt gilt, dass Faseranzahlkonzentrationen und nicht nur Massenkonzentrationen bestimmt werden sollten. Dafür bedarf es einer klaren Einstufung von Carbonfasern als Fasern bzw. Quelle für inhalierbare Fasern (WHO-Fasern). Mangels einer anderen Regelung wird häufig der massenbezogene Grenzwert für elementaren Kohlenstoff herangezogen, der aber im Falle einer kritischen Geometrie diese unberücksichtigt lässt.
- Da während der Aufklärung dieser offenen Fragen der Umgang mit CF/CFK u. a. bei der baustellenseitigen Abfallbehandlung, deren Aufbereitung und Verwertung von Rotorblättern nicht eingestellt wird, sollten nach dem Fürsorgeprinzip folgende Maßnahmen ergriffen werden:
  - Keine Freisetzung von CF-haltigen Partikeln und Fasern in die Umwelt. Sowohl für Emissionen in die Luft, als auch Boden und Gewässer sind geeignete Schutzmaßnahmen zu treffen, also in erster Linie Rückhaltemaßnahmen durch Absaugen und Auffangen von Abwässern.
  - Schutz der Arbeitnehmer durch Einhausung der Prozesse mit Absaugung und geeigneter Filterung im Abgas.
  - Sollte dennoch das Risiko einer Exposition der Arbeitenden bestehen, so sind diese mit persönlicher Schutzausrüstung, konkret einer Atemmaske mit mindestens der Filterklasse P2/FFP2 auszustatten.

4 Baustellenseitige Abfallbehandlung

4.1 Einleitung

Die Schritte des Rückbaus einer WEA erfolgen ähnlich wie der Aufbau in umgekehrter Reihenfolge: Baustellensicherung und Stilllegung, Rotordemontage, Maschinenhausdemontage, Turmrückbau, Fundamentrückbau und Renaturierung. Die Größe der notwendigen Gerätschaften richtet sich dabei nach der Bauart des Turmes, der Nabenhöhe und dem Gewicht der zu demontierenden Bauteile. Die Demontage des Rotors und Maschinenhauses mit Getriebe und Elektronik erfolgt mit Hilfe eines Mobilkrans und/oder Kranaufsatzes. Im Fall der baustellenseitigen Behandlung der Rotorblätter ist es aus bisheriger Sicht günstiger, die Rotorblätter direkt vor Ort in transportfähige Stücke zu zerkleinern und mit Standardfahrzeugen zum Entsorgungsfachbetrieb für die weitere Aufbereitung zu bringen. Dies erspart erforderliche Schwertransportgenehmigungen für Altrotorblätter und reduziert gleichzeitig durch die gesonderte weitere Behandlung die baustellenseitige Belastung der Umwelt. Der Rückbau beginnt mit einer Rotorblattdemontage, gefolgt von einer Segmentierung und Zerkleinerung sowie einer Entsorgung. Die Verfahren für eine baustellenseitige Segmentierung werden in diesem Kapitel genauer betrachtet und bewertet. Dabei sollte es das Ziel sein, so wenig wie nötig Schnitte durchzuführen, um einen möglichst schnellen Abtransport zu ermöglichen oder um eine gesonderte Behandlung an einem dafür geeigneten Aufbereitungsplatz vorzunehmen. In Abgrenzung dazu erfolgt die Aufbereitung des Rotorblattmaterials für eine spätere Verwertung in Geräten oder Maschinen mit einem begrenzten Aufnahmevermögen bezüglich der Länge und Breite des Materials.

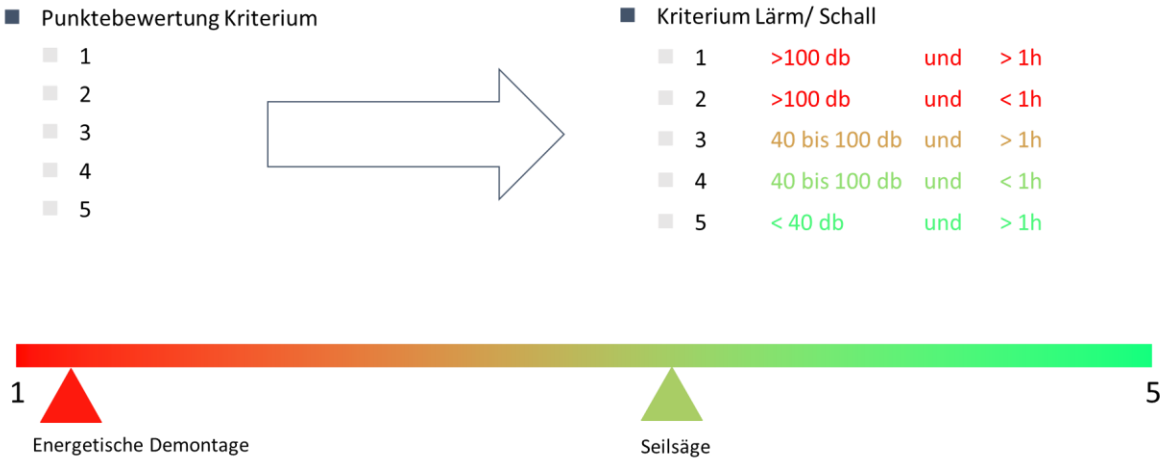
4.1.1 Methodisches Vorgehen

Für die Beschreibung und Bewertung der unterschiedlichen Technologien zur Segmentierung/ Zerlegung von Rotorblättern vor Ort an der WEA wurde eine Recherche nach dem Stand der Technik und Stand der Forschung durchgeführt (vgl. Kap. 4.3).

Neben einer technologischen Beschreibung werden die aufgeführten Zerkleinerungsprozesse hinsichtlich einheitlicher technologischer und wirtschaftlicher Kriterien beurteilt. Diese umfassen unter anderem die technischen Möglichkeiten, die erzielten Separationserfolge, den Energiebedarf, die Wirtschaftlichkeit (inkl. Transporten, Handling) sowie die ökologischen Auswirkungen und dabei insbesondere die lokalen Auswirkungen der genannten Zerkleinerungsprozesse auf die Umwelt (Boden- und Stoffbelastung, Bodenverdichtung durch Geräte und Maschinen, usw.) gemäß dem Bundesbodenschutzgesetz (BBodSchG).

Zur Bewertung der Verfahren wurden unterschiedliche Kriterien ausgewählt (Tabelle 36) und diese in Bewertungsstufen (Abschnitt 4.4) gegliedert. Für die Bewertung der Technologien soll die in Abbildung 108 beispielhaft für das Kriterium Lärm aufgeführte Bewertungsskala angewendet werden.

Abbildung 108: Beispiel für die Bewertung: Hauptkriterien-Skala für den Faktor „Lärm“.



Quelle: Eigene Darstellung, Fraunhofer-ICT.

Die Kriterien lassen sich anschaulich in einem Netzdiagramm darstellen, wobei alle Achsen die Stufen der Bewertungsskala aufweisen. Im äußeren Bereich liegt das Maximum der aus Sicht des Umweltschutzes positiven Bewertung. Alle Kriterien werden mit Hilfe der Bewertungsstufen auf den Schnittpunkten (Kreis mit Strahl) angekreuzt und mit Linien verbunden. So ergibt sich, wenn alle Bewertungen vorhanden sind, individuell für jede Technologie eine spezifische Fläche, wodurch die Verteilung über die jeweiligen Kriterien sehr gut deutlich wird. Voraussetzung dafür ist jedoch, dass die notwendigen Angaben zu den unterschiedlichen Kriterien in quantitativen Werten vorliegen.

Ein direkter Vergleich der bereits erprobten und neuen Verfahren in einem Netzdiagramm erscheint durch die großen Unsicherheiten bei Verfahren im Forschungsstadium nicht immer geeignet, da das Potential der neuen Verfahren dabei nicht erfasst wird. Für einen Vergleich der Verfahren müssen die jeweils erreichten, unterschiedlichen Bewertungsstufen eine Gewichtung in Abhängigkeit von dem gesamten Zielerreichungsgrad erhalten.

4.1.2 Auswahl der technologischen und wirtschaftlichen Kriterien

Für eine Bewertung der unterschiedlichen Technologien erfolgte die Auswahl der technologischen, ökologischen und wirtschaftlichen Kriterien gemeinsam mit dem Auftraggeber. In Tabelle 36 sind in der ersten Spalte die Kriterien für die Technologiebewertung aufgeführt und in der zweiten Spalete genauer erläutert. Die unterschiedlichen Technologien sollen hinsichtlich der Emission in die Umwelt wie z. B. Luft oder Wasser, aber auch bezüglich Ihrer Sicherheit, Wirtschaftlichkeit und dem Potential für eine spätere Verwertung bewertet werden.

Tabelle 36: Technologische und wirtschaftliche Kriterien.

Kriterium	Beschreibung
Partikel-Luftemissionen	Bei der Demontage werden Partikel erzeugt und freigesetzt, die in die Luft abgegeben werden und damit den Boden und die Gewässer kontaminieren könnten.
Befahrung / Bodenverdichtung	Anzahl, Art und Gewicht der Transportsysteme bei unterschiedlichen Demontagestrategien ist von Bedeutung

Kriterium	Beschreibung
Prozesswasser	Systeme benötigen Wasser, einerseits als Kühlwasser und andererseits um die emittierten Partikel abzufangen. Dieses Wasser ist kontaminiert und muss aufgefangen werden, damit Böden und Gewässer von Partikeln nicht belastet werden.
Sicherheit	Risiko für den Technologiebediener durch den Demontageprozess (u. a. auch Verletzungsrisiko).
Lärm / Schall	Geräuschbelastung durch die Technologie für Mensch und Natur
Demontageziel	Abwägung von Aufwand und Nutzen sowie technische Möglichkeiten zur Erreichung eines Demontage- und Separationsziels
Sortenreinheit / Qualität	Grad der Materialtrennung z. B. anhand der Schnittlinien, wodurch eine Wiederverwendbarkeit oder Recyclingfähigkeit beeinflusst wird.
Energiebedarf	Bereitzustellende Energie für das System (Demontage + Emissionsminderung etc.)
Wirtschaftlichkeit	Kosten für Demontage und emissionsmindernde Maßnahmen
Verfahrensreife / Praxistauglichkeit	Entwicklungsstand bei Technologien aus der Forschung und regionale Verfügbarkeit

Quelle: Eigene Zusammenstellung, Fraunhofer-ICT.

4.1.3 Skala für die Auswertung der einzelnen Kriterien

4.1.3.1 Partikelemissionen in die Luft

Unter Partikel-Luftemissionen wird die Freisetzung von Partikeln bei dem Prozess der Demontage verstanden. Zu bewerten ist dabei, ob Partikel über die Luft in die Umwelt gelangen können.

Tabelle 37: Punktekatalog für die Kriterien zur Beurteilung von Partikelemissionen

Punkte	Kriterienbeschreibung
5	Durch die Technologie werden nachweisbar keine Partikel freigesetzt.
4	Durch die Technologie werden Partikel freigesetzt, aber nachweisbar über eine Absaugung oder Bewässerung gebunden.
3	Durch die Technologie werden Partikel freigesetzt, eine Absaugung oder Bewässerung ist vorhanden, die Bindung der Partikel aber nicht analytisch nachgewiesen.
2	Durch die Technologie werden Partikel freigesetzt, aber keine Maßnahmen zur Bindung getroffen
1	Nicht definierbar, von einer Freisetzung der Partikel ist auszugehen, hohes Kontaminationsrisiko

Quelle: Eigene Zusammenstellung, Fraunhofer-ICT.

4.1.3.2 Befahrung/Bodenverdichtung

Durch eine erhöhte Befahrung der Fläche für die Demontage von Rotorblättern kann es zu einer Bodenverdichtung kommen, welche zu bewerten ist.

Tabelle 38: Punktekatalog für die Kriterien zur Beurteilung der Bodenverdichtung

Punkte	Kriterienbeschreibung
5	Separater verdichteter Platz an der WEA für die Demontage von Anlagenteilen der WEA
4	Keine Auswirkungen auf die Bodenverdichtung bzw. keine übermäßige Befahrung durch die Technologie und den Abtransport
3	Kleinere Transportfahrzeuge für den genehmigungsfreien Transport
2	Größere, schwere Transportfahrzeuge für Sondertransporte
1	Die Bodenverdichtung und Befahrung durch die Demontagetechnologie ist viel höher als die Auswirkungen durch die Demontage der WEA

Quelle: Eigene Zusammenstellung, Fraunhofer-ICT.

4.1.3.3 Prozesswasser

Für eine Bindung der bei einer Demontage entstehenden Partikel/Stäube wird häufig Wasser eingesetzt. Es ist zu bewerten, ob das Prozesswasser eine Gefahr für die Umwelt darstellt.

Tabelle 39: Punktekatalog für die Kriterien zur Beurteilung des Umgangs mit Prozesswasser

Punkte	Kriterienbeschreibung
5	Das Prozesswasser wird aufgefangen, direkt filtriert und kann in die Umwelt eingeleitet werden.
4	Das Prozesswasser wird aufgefangen und im Kreislauf verwendet.
3	Das Prozesswasser wird aufgefangen, gesammelt und separat aufgereinigt oder entsorgt.
2	Es existieren technische Lösungen zum Auffangen des Prozesswassers.
1	Keine Angaben oder Information, das Wasser gelangt ohne Schutz in den Boden.

Quelle: Eigene Zusammenstellung, Fraunhofer-ICT.

4.1.3.4 Sicherheit

Die bei der Demontage entstehenden Staubpartikel können ein Risiko für den Bediener der Technologie darstellen, welches es zu bewerten gilt. Dabei besteht ein großer Zusammenhang mit der Kategorie der Freisetzung von Partikel, der Luftemission, wobei der Fokus hier auf den Bediener gelegt wird.

Tabelle 40: Punktekatalog für die Kriterien zur Beurteilung der Sicherheit

Punkte	Kriterienbeschreibung
5	Die Technologie läuft autonom, der Bediener ist keinem Risiko ausgesetzt.
4	Der Bediener arbeitet mit Abstand zur Technologie z. B. in einem Führerhaus.
3	Manuelle Bedienung, mit Kapselung, Absaugung oder Bewässerung während des Prozesses.
2	Manuelle Bedienung notwendig, Bediener über persönliche Schutzausrüstung (PSA) geschützt.
1	Nicht definierbar, hohes Gesundheitsrisiko

Quelle: Eigene Zusammenstellung, Fraunhofer-ICT.

4.1.3.5 Lärm/Schall

Die oben besprochenen Technologien sollen hinsichtlich ihrer Geräuschemissionen beim Demontageprozess bewertet werden. Dabei werden, wenn möglich, die Lautstärke, Frequenz und Dauer des Ereignisses bewertet.

Tabelle 41: Punktekatalog für die Kriterien zur Beurteilung der Lärmbelastung

Punkte	Kriterienbeschreibung
5	< 40db und mehr als 1 Stunde
4	40 bis 100 db und weniger als 1 Stunde
3	40 bis 100 db und mehr als 1 Stunde
2	> 100 db und weniger als 1 Stunde
1	> 100 db und mehr als 1 Stunde

Quelle: Eigene Zusammenstellung, Fraunhofer-ICT.

4.1.3.6 Demontageziel

In Abstimmung mit Kapitel 5 und Kapitel 6 muss das Demontageziel beschrieben und die Erreichung durch die Technologie bewertet werden. Dabei geht es um den Einsatz vor Ort an der WEA.

Tabelle 42: Punktekatalog für die Kriterien zur Beurteilung des Montageziels

Punkte	Kriterienbeschreibung
5	Hochwertige Fraktionen in individuell gestaltbaren Formen können für eine Weiterverwendung bereitgestellt werden.
4	Das Heraustrennen und die Separation von unterschiedlichen Stör- oder Wertstoffen sind möglich.
3	Das Heraustrennen von unterschiedlichen Fraktionen, Stör- oder Wertstoffen z. B. der CFK-haltigen Fraktionen ist möglich.
2	Demontage und Separation zum Zweck des Recyclings
1	Demontage in transportfähige Stücke

Quelle: Eigene Zusammenstellung, Fraunhofer-ICT.

4.1.3.7 Sortenreinheit/Qualität

Für eine Verwertung der im Rotorblatt enthaltenen Fraktionen muss die Sortenreinheit und Qualität der Fraktionen bewertet und eine Schädigung durch die Demontagetechnologie betrachtet werden.

Tabelle 43: Punktekatalog für die Kriterien zur Beurteilung des Sortenreinheit und -Qualität

Punkte	Kriterienbeschreibung
5	Intakte Komponenten, welche sich als Ersatzteile eignen.
4	Intakte Rotorblattabschnitte, welche sich für die Weiterverwendung eignen.
3	Sortenreine Materialien in guter Qualität, die sich für das Recycling eignen.

Punkte	Kriterienbeschreibung
2	Sortierte Fraktionen, welche durch die Demontage stark beschädigt wurden.
1	Vermischte Materialien, die durch die Demontage zerstört wurden.

Quelle: Eigene Zusammenstellung, Fraunhofer-ICT.

4.1.3.8 Verfahrensreife/Praxistauglichkeit

Insbesondere für sich noch in der Entwicklung befindliche Demontageverfahren wurde der Punkt der Verfahrensreife und Praxistauglichkeit hinzugenommen, um die Eignung für den Einsatz zur baustellenseitigen Abfallbehandlung bewerten zu können.

Tabelle 44: Punktekatalog für die Kriterien zur Beurteilung des Sortenreinheit und -Qualität

Punkte	
5	In der Praxis erprobt und vor Ort ohne Einschränkungen einsetzbar
4	
3	Technologie für die Demontage von Rotorblättern gerade in der Erprobung
2	
1	Nicht definierbar, bisher nicht angewendet

Quelle: Eigene Zusammenstellung, Fraunhofer-ICT.

4.1.3.9 Energiebedarf

Der Energiebedarf der Demontagetechnologie ist von mehreren Faktoren abhängig, u. a. von der Anzahl der Schnitte, dem Transport des Materials oder der Größe und der Materialzusammensetzung des Rotorblatts. Eine vergleichbare Aussage zum Energiebedarf lässt sich daher nicht ableiten und wurde auch in den geführten Interviews von den Technologieanbietern nicht beantwortet.

4.1.3.10 Wirtschaftlichkeit

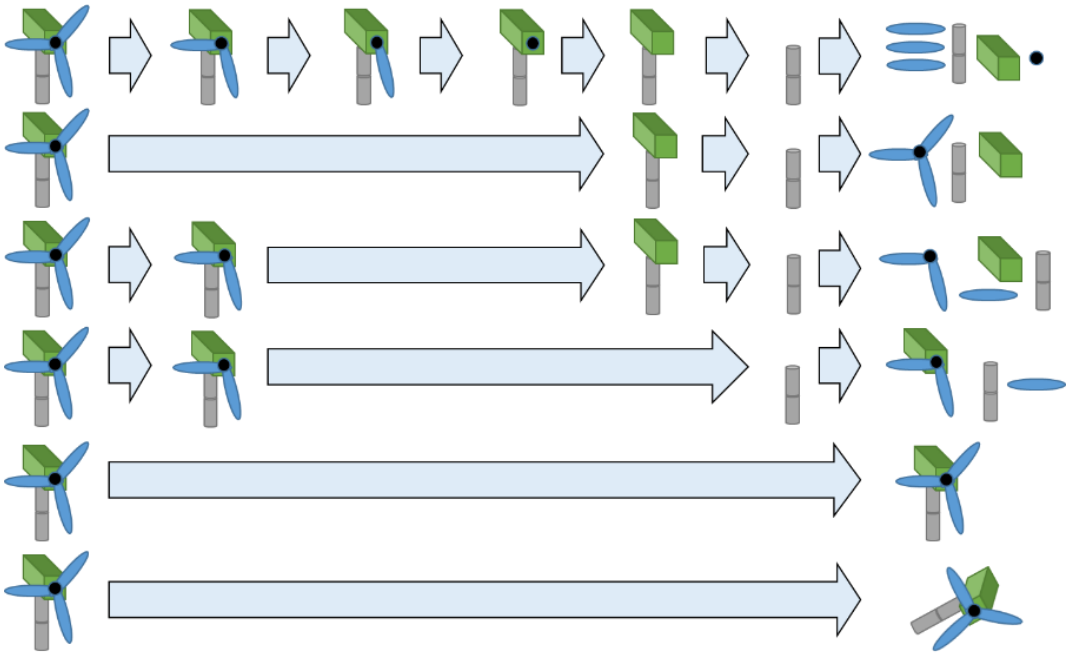
Die Wirtschaftlichkeit der Demontagetechnologie ist ebenfalls von mehreren Faktoren abhängig, u. a. von der Anzahl der Schnitte, dem Transport des Materials oder der Größe des Rotorblatts. Eine vergleichbare Aussage zur Wirtschaftlichkeit lässt sich daher nicht ableiten und wurde auch in den geführten Interviews von den Technologieanbietern nicht beantwortet.

4.2 Demontage der Rotorblätter

Die Demontage der Rotorblätter stellt den ersten Schritt für den Rückbau einer WEA dar. Mit Hilfe eines Krans, welcher auf einer eigens dafür geplanten Stellfläche aufgestellt wird, werden die Rotorblätter einzeln oder als Satz (3 Rotorblätter) abgenommen und auf dem Boden abgelegt.

In Abbildung 109 sind unterschiedliche Lösungsschritte für die Rotorblattdemontage dargestellt. Die ersten vier Lösungen sind abhängig von der Traglast des Krans und von der Lagerfläche. In Deutschland werden überwiegend die Lösungen 1 (Demontage der einzelnen Rotorblätter) bei großen Anlagen bzw. bei Anlagen mit einer begrenzten Lagerfläche und Lösung 2 (Demontage des gesamten Rotors und der Nabe) bei kleineren Modellen mit ausreichend Lagerfläche angewendet.

Abbildung 109: Schritte für den Rückbau von Windenergieanlagen.



Quelle: Eigene Darstellung, Fraunhofer-ICT, nach Hechler (2019).

4.3 Technologien zum Zerlegen von Rotorblättern auf der Baustelle

Ziel der Zerlegung von Rotorblättern vor Ort an der Baustelle ist bei einem Rückbau der WEA in den meisten Fällen der günstige und schnelle Abtransport der Materialien für eine weitere Verwertung. Dabei können zur Zerlegung von faserverstärkten Kunststoffen unterschiedliche Technologien zum Einsatz kommen, die im Folgenden genauer erläutert werden.

4.3.1 Wasserstrahlschneiden

„Das Wasserstrahlschneiden ist ein Fertigungsverfahren aus der Hauptgruppe des Trennens. Dort ist es gemeinsam mit dem Laserstrahlschmelzschneiden, dem Brennschneiden und dem Plasma-Schmelzschneiden der Gruppe der abtragenden Verfahren zugeordnet“ (Finitec 2021).

„Die Einrichtung zur Durchführung des Strahlschneidprozesses ist zur Erzeugung eines Stoffstroms ausgebildet, der aus einem Schneidmedium besteht oder zumindest ein Schneidmedium aufweist. Der Stoffstrom verfügt über einen möglichst kleinen Strömungsquerschnitt sowie über eine möglichst hohe Strömungsgeschwindigkeit, so dass der auf das großformatige Sperrgut auftreffende Stoffstrom das Sperrgut im Wege eines abrasiven, lokalen Materialabtrages zu zerteilen in der Lage ist. In Abbildung 110 sind die Wasserstrahlschneider ohne Abrasivmittel dargestellt. In einer besonders bevorzugten Ausführungsform der Einrichtung zur Erzeugung eines Strahlschneidprozesses dient als Schneidmedium eine Flüssigkeit, vorzugsweise Wasser, die mit einem sehr hohen Förderdruck, typischerweise von bis zu 6.000 bar, einer Schneiddüsenanordnung zugeführt wird, aus der der Wasserstrahl mit einer Austrittsgeschwindigkeit von bis zu 1000 m/s und einem Strahldurchmesser von 1 mm und kleiner austritt. Vorzugsweise können dem aus der Wasserstrahlschneiddüsenanordnung austretenden Wasserstrahl zusätzliche Werkstoffe mit abrasiver Wirkunge zugesetzt sein, die die Schneidwirkung erhöhen.“ (Thomas Drewes-Lojewski)

Mit Wasserstrahlen kann eine Vielzahl von Materialien wie Marmor, Granit, Stein, Metall, Kunststoff usw. geschnitten werden. Das Verfahren ist umweltfreundlich, was Staubemissionen betrifft, aber der Wasserverbrauch ist im Vergleich zu den anderen betrachteten Methoden hoch, da dieses nicht nur als Kühlmedium, sondern zum Schneiden verwendet wird.

Die Strahlleistung P am Düsenausgang kann aus dem Querschnitt A der Düse, der Dichte der Flüssigkeit ρ und der Strahlgeschwindigkeit v berechnet werden zu (Fritz und Schulze 2015)

$$P = \rho A \frac{v^3}{2}$$

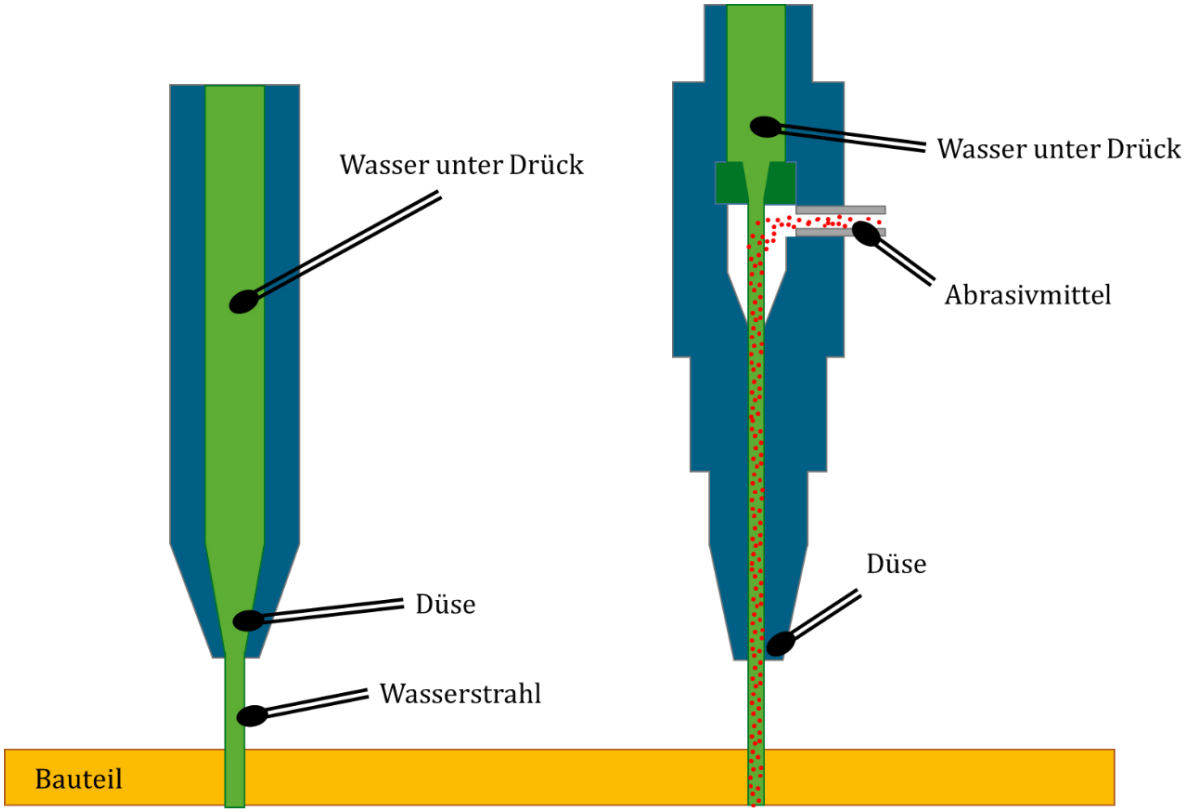
mit

$$v = \sqrt[2]{\frac{2p}{\rho}}.$$

Die wesentlichen Einflüsse auf die Strahlleistung sind der Durchmesser der Düse und der Druck. Zur Erzeugung des Wasserdrucks werden hydraulische Druckübersetzer oder mechanische Hochdruckpumpen eingesetzt.

Die Schneidwirkung wird grundsätzlich über einen Hochgeschwindigkeitswasserstrahl erzeugt, bei dem die potentielle Energie des Wassers bei einem Druck bis mehr als 4.000 bar über eine Düse in kinetische Energie mit Geschwindigkeiten bis über 800 Meter pro Sekunde umgewandelt wird (ROTH&EFFINGER GmbH 2021). Schließlich kann die Lärmemission bis zu 95 dB erreichen (Kalla et al. 2012).

Abbildung 110: Darstellung der Wasserstrahlschneider ohne (links) und mit (rechts) Abrasivmittel.



Quelle: Eigene Darstellung, Fraunhofer-ICT.

Für das Schneiden wurde der Wasserstrahl bereits in verschiedenen Onshore-Anwendungen eingesetzt. Die Automatisierung der Verfahren wird in FVK-Fertigungsverfahren und bei der Demontage der Rotorblätter umgesetzt. In Abbildung 111 ist ein von der Hanseatic Rohr GmbH, Bargeshagen patentiertes Verfahren dargestellt (Thomas Drewes-Lojewski).

Patentiert wurde eine Anordnung zum Zerteilen von großformatigem, Faserverbundmaterial-anteile enthaltendem Sperrgut, insbesondere Rotorblättern für Windenergieanlagen. Der Zerteileinheit kann über eine entsprechende Einrichtung das großformatige Sperrgut zugeführt werden. Die Erfindung zeichnet sich dadurch aus, dass die Zerteileinheit einen Handhabungsroboter sowie eine Sensoreinrichtung umfasst, welche in einem umschlossenen Raum steuerbar sind. Der Roboter ist mit einer Einrichtung zur Durchführung eines Strahlschneidprozesses und mit einer Schneidmedium austragenden Strahlschneiddüsenanordnung kombiniert. Die Positionierung des Roboters im Arbeitsraum wird durch ortsaufgelöste Sensorsignale gestützt, wozu eine Steuereinheit vorhanden ist, welche mit der Sensoreinrichtung in Datenverbindung steht (Thomas Drewes-Lojewski).

Um die Partikelfreisetzung zu vermeiden, ist zumindest der Arbeitsraum, der den Handhabungsroboter sowie die Sensorik umfasst, mit einer zelt- oder kabinenartig ausgebildeten Umhausung umgeben, die aufwandsarm montier- sowie demontierbar ist. Die Umhausung sieht für eine seitliche Zuführung des großformatigen Sperrgutes einen Zuführbereich vor, der möglichst bündig an die Raumform des in den Arbeitsraum hineinreichenden Sperrgutes flexibel angepasst ist. In einer bevorzugten Ausführungsform ist der umfasste Raum mit einer Unterdruckquelle verbunden, so dass sichergestellt ist, dass aufgrund des Unterdrucks kein Materialaustrag in die Umwelt stattfindet.

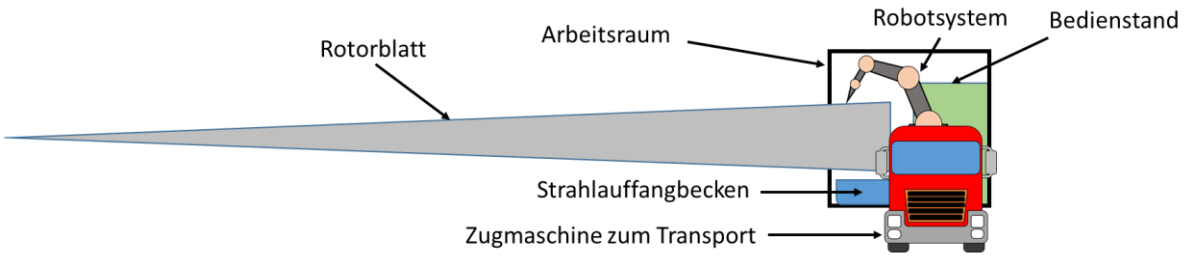
Die Zuführung des großformatigen Sperrgutes erfolgt diskontinuierlich, vorzugsweise mit Hilfe einer im oder in Förderrichtung vor dem Arbeitsraum im Bereich des Zuführbereiches angebrachten Seilzugeinrichtung. Im Falle eines zu zerteilenden Rotorblatts wird das Rotorblatt beginnend mit dem der Rotorblattnabe zugewandten Rotorende auf ein innerhalb oder in Förderrichtung vor dem Arbeitsraum angebrachtes Auflager aufgelegt und befestigt, so dass das Rotorblattende in den Arbeitsraum zu Zwecken der Separierung in Quadratmeter groß messende Rotorblattfragmente teilweise hineinragt.

Mit Hilfe einer im Bereich des Arbeitsraums zusätzlich vorgesehenen Manipulatoreinheit, beispielsweise in Form eines Transportbandes, auf welches die abgetrennten Fragmente fallen und/oder mithilfe eines Robotergreifarmes abgelegt werden, gelangen die separierten Fragmente aus dem Arbeitsraum, und können in geeigneter Weise zur Verladung auf LKW zum Abtransport verbracht werden (Thomas Drewes-Lojewski).

„Um einen möglichst flexiblen und schnellen Einsatz der Anordnung vor Ort realisieren zu können, sieht eine bevorzugte Ausführungsform die Anbringung der Anordnung auf einer für den Straßentransport zugelassenen mobilen Plattform, beispielsweise in Form eines LKW-Anhängers, vor. Form, Gewicht und Anordnung zumindest der Zerteileinheit, umfassend den Handhabungsroboter, die Sensoreinrichtung und die Einrichtung zur Durchführung des Strahlschneidprozesses sowie der Steuereinheit, sind in geeigneter Weise unter Maßgabe an die für Straßen zugelassenen Lastkraftwagen zu wählen.“ (Thomas Drewes-Lojewski)

Das Verfahren emittiert ca. 80 bis 95 dB (Kalla et al. 2012).

Abbildung 111: Hanseatic Rohr GmbH, Demontage Verfahren.



Quelle: Eigene Darstellung, Fraunhofer-ICT, nach Miesenburg (2020).

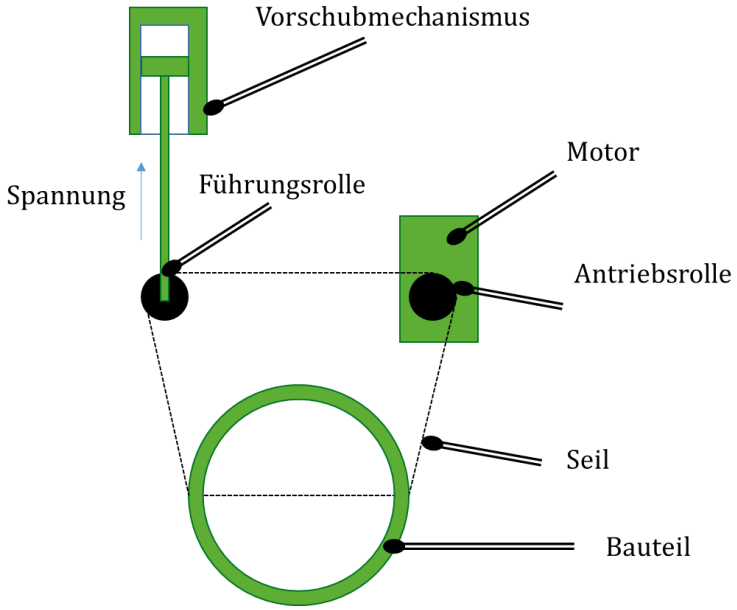
4.3.2 Seilsäge

Eine stetige Weiterentwicklung der Seilsägen machte dieses Verfahren zu einem Allrounder, der es in vielen Industriezweigen möglich macht, nahezu jede Form und jedes Material zu schneiden. In dem folgenden Kapitel werden eine kurze Einführung der verschiedenen Diamantseilsägen und deren verschiedene Ausführungen, die wesentlichen Arbeitsprinzipien und Komponenten sowie abschließend eine Zusammenfassung der relevanten Vor- und Nachteile gegeben.

Das allgemeine Arbeitsprinzip gilt für jeden Diamantseilsägetyp. Um das Funktionsprinzip einer Diamantseilsäge etwas praktischer zu demonstrieren, wurde eine vereinfachte Darstellung gewählt. Wie in Abbildung 112 dargestellt, besteht die Diamantseilsäge im Allgemeinen aus den folgenden Teilen:

- Motor (Antriebsaggregat)
- Diamantseil
- Antriebs- und Führungsrollen
- Vorschubmechanismus

Abbildung 112: Funktionsprinzip einer Diamantseilsäge.

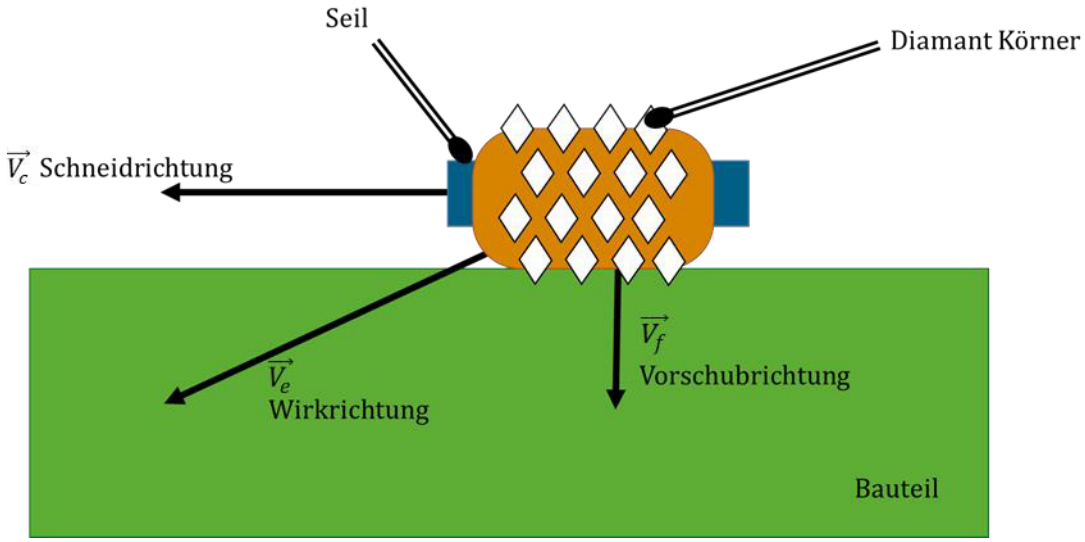


Quelle: Eigene Darstellung, Fraunhofer-ICT, nach Hechler (2019).

Die Konstruktion einer Diamantseilsäge muss das Seil auf eine gewünschte Geschwindigkeit beschleunigen und die notwendige Spannung des Seils für den Schneidvorgang aufrechterhalten. Ein Motor treibt die Antriebsscheibe an, die das Diamantseil führt. Durch die Bewegung des Seils und der eingeleiteten Seilspannung kann der Materialabrieb an den Kontaktstellen von Seil und Werkstück festgestellt werden. Eine angemessene Seilspannung ist erforderlich, um effektive Schnittgeschwindigkeiten zu gewährleisten sowie das Seil vor thermischer und mechanischer Überlastung zu schützen. Um eine konstante Drahtspannung zu halten, werden unterschiedliche Vorschubmechanismen verwendet. In Abbildung 112 ist die Anwendung eines Hydraulikzylinders dargestellt, der mit einer der Führungsrollen verbunden ist. Ein Ausfahren des Zylinders verringert die Drahtspannung, während ein Einfahren des Zylinders eine Erhöhung der Drahtspannung bewirkt. Eine weitere Methode zur Einstellung der Seilspannung kann die Relativbewegung der Seilsägen-Stützstrukturen zum Werkstück sein (Hechler 2019).

Im Folgenden soll ein kleiner Einblick in den eigentlichen Schneidprozess einer Diamantseilsäge gegeben werden. Das sich beschleunigende Diamantseil wird mit einer vordefinierten Vorspannung am Werkstück befestigt. Die Schneidgeschwindigkeit und -richtung (V_c) in Kombination mit einer vorgegebenen Vorschubrichtung (V_f) ergibt eine Wirkrichtung (V_e). In Abbildung 113 kann die Prozesskinematik eines Diamantsegments in Kontakt mit dem Werkstück während eines Schneidvorgangs visualisiert werden.

Abbildung 113: Prozesskinematik eines Diamantsegments in Kontakt mit dem Werkstück.



Quelle: Eigene Darstellung, Fraunhofer-ICT, nach Hechler (2019) und Knecht (2015).

Üblicherweise werden die meisten Seilsägen von Hydraulik- oder Elektromotoren angetrieben. Die Leistungsabgabe des Motors ist direkt mit der Seilantriebsscheibe gebunden. Die Erfahrungen beim Schneiden von Rotorblättern haben gezeigt, dass eine Leistung von 15 bis 20 kW genügt, um eine Blattwurzel mit einem Durchmesser von 2 m und einer Materialstärke von etwa 330 mm in weniger als 15 min zu schneiden (Hechler 2019).

Das Diamantseil kann als der wesentlichste Teil der Diamantseilsäge angesehen werden. Einer der größten Vorteile einer Seilsäge ist die Fähigkeit, jedes Material zu schneiden, das weicher als Diamant ist, und eine theoretisch unendliche Länge des Seils, die die Möglichkeit bietet, große Strukturen zu schneiden.

Das Grundelement des Diamantseils ist das Tragseil. Das Tragseil besteht in der Regel aus Stahl mit feinen Litzen und einer hohen Bruchlast (>19.000 N) (Hechler 2019). Die beschichteten

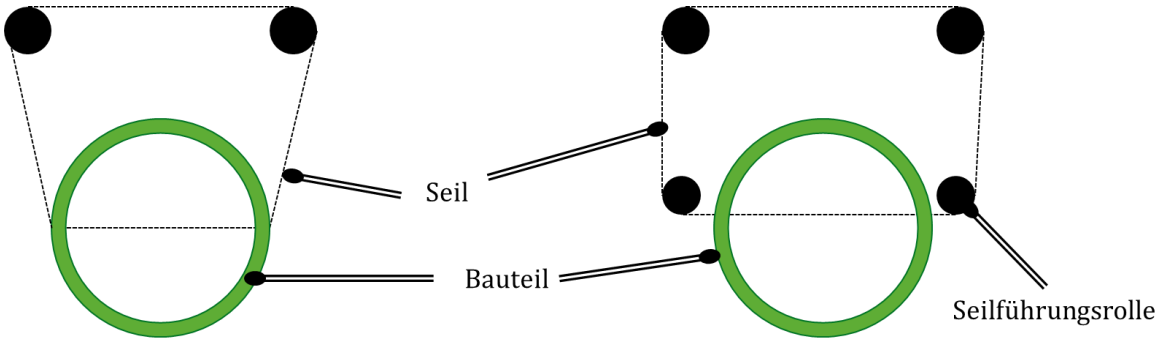
Diamantringe/-segmente sind die eigentlichen Schneidelemente, die auf das Halteseil aufgefädelt werden. Die Diamantbeschichtung wird durch ein galvanisches oder aktives Lötverfahren oder ggfls. durch das Verfahren der gesinterten Diamantimprägnierung auf die Tragringe aufgebracht (Hechler 2019).

Zum Schutz des Tragseils werden verstärkte Federn als Abstandselement zwischen den Diamantsegmenten verwendet. Zur Sicherung der Diamantsegmente auf dem Gewinde werden eine Gummihülle sowie ein Korrosionsschutzmittel für das Halteseil verwendet. Um das Seil reparieren, öffnen und schließen zu können, wird ein Verschluss angebracht. Aufgrund der Konstruktion des Verschlusses ist es von größter Wichtigkeit, dass der Draht in seiner festgelegten Laufrichtung betrieben wird. Um den besten Kompromiss zwischen Schneidzeit, Schnittqualität und Werkzeugverschleiß zu erreichen, muss die Geschwindigkeit des Drahtes auf das jeweilige Material und die zu schneidende Struktur abgestimmt werden. Die Erfahrung hat gezeigt, dass für FVK die Schnittgeschwindigkeit von ca. 30 m/s ausreichend ist (Hechler 2019).

Die Hauptaufgabe der Verdrahtungsführungsrollen lässt sich aus ihrem Namen ableiten. Führungsrollen haben die Aufgabe, das Diamantseil so zu führen, dass die richtige Ausrichtung für einen geraden Schnitt gewährleistet ist. Der Einsatz von Seilführungsrollen bietet die Möglichkeit, auch schwer zugängliche Strukturen zu schneiden, ohne dass die Schnittqualität darunter leidet. Außerdem werden bei einigen Schneidvorgängen Umlenkrollen eingesetzt, um den Anstellwinkel des Diamantseils zu verringern. Obwohl ein bestimmter Anstellwinkel erforderlich ist, verursacht ein knickendes Diamantseil mit einem zu großen Anstellwinkel eine hohe Belastung für die feinen Metalllitzen des Tragseils. Eine hohe Beanspruchung der feinen Metalllitzen führt zu Ermüdung und damit zu einer Verringerung der Standzeit des Schneiddrahtes (Hechler 2019).

Wie in Abbildung 114 links exemplarisch dargestellt, kann der Anstellwinkel beim Schnitt eines rohrförmigen Bauteils fast 80° bis 90° erreichen. Ein Anstellwinkel von fast 90° bedeutet eine enorme Belastung für das Diamantseil. Um diese großen Anstellwinkel zu vermeiden, werden Stützbügel mit zusätzlichen Seilführungsrollen eingesetzt. Die Anwendung von Stützwinkeln sowie ein zunehmender Biegeradius und damit ein abnehmender Anstellwinkel sind in Abbildung 114 rechts schematisch zu sehen (Hechler 2019).

Abbildung 114: Diamantseilsäge Systeme ohne (links) und mit (rechts) Seilführungsrollen.



Quelle: Eigene Darstellung, Fraunhofer-ICT, nach Hechler (2019) und Knecht (2015).

Beim Schneiden von FVK ist es erforderlich, eine ausreichende Wassermenge während des gesamten Schneidvorgangs zuzuführen. Wasser dient als Kühlmittel sowohl für das Diamantseil als auch für den Schneidbereich. Durch den Kontakt und die Relativbewegung zwischen dem Diamantseil und der Klinge wird durch die vorhandene Reibung zwischen diesen beiden Oberflächen kinetische Energie in thermische Energie (Wärme) umgewandelt. Thermische Hotspots im Schnittbereich können zum Schmelzen des Materials führen. Verstopfte

Schneidelemente erhöhen die Betriebszeit, verringern die Schnittqualität und erfordern den Austausch der Diamantsegmente, was die Betriebskosten erhöht. Zur Vermeidung von thermischen Hotspots müssen das Diamantseil und der Schneidbereich mit Wasser gekühlt werden.

Das Verfahren emittiert ca. 85 bis 93 dB (TYROLIT Hydrostress AG 2009). Im Folgenden sind die in der Literatur aufgeführten Hauptvorteile der Diamantseilsägeverfahren dargestellt (Knecht 2015):

- Hohe Flexibilität in der Anwendung
- Keine Einschränkungen hinsichtlich Schnitttiefe und Werkstückform
- Schneidet praktisch alle Materialien
- Benötigt geringe Antriebsleistung
- Hohe Genauigkeit des Schnitts
- Geringe Rüstzeiten und geringe Größe und Gewicht der mobilen Einheiten
- Geringe Lärmemission
- Geringe Wärmeentwicklung durch mehr Schneidelemente (Diamanten)
- Geringe Personalkosten
- Einfache Handhabung der Maschine
- Fernsteuerbar.

Im Folgenden sind die in der Literatur aufgeführten Hauptnachteile der Diamantseilsäge-Verfahren dargestellt (Knecht 2015):

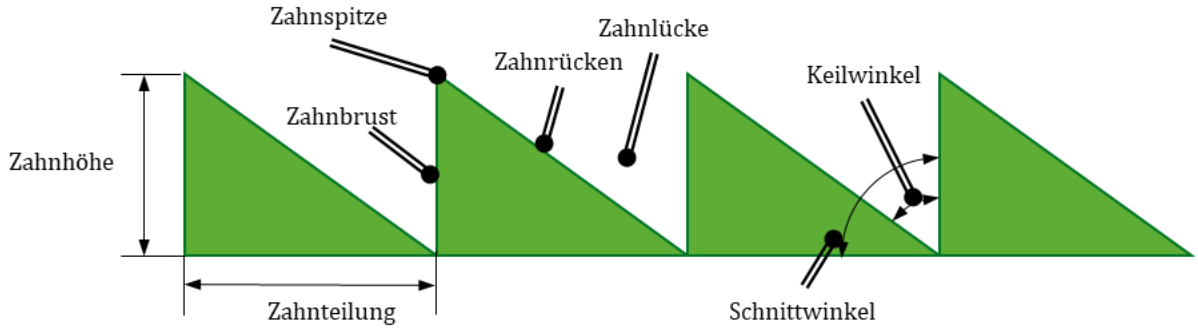
- Relativ große Schnittbreite
- Relativ grobe Schnittfläche
- Hohes Risiko durch abreißendes Diamantseil
- Werkstück muss fest eingespannt sein, um ein Einklemmen des Drahtes zu vermeiden
- Relativ hohe Kosten für Schneidelemente
- Hoher Werkzeugverschleiß
- Hoher Sekundärabfall im Vergleich zu anderen Schneidverfahren (z. B. Staub und kontaminiertes Wasser).

4.3.3 Mobile Sägen

Nach DIN 8589 ist das Sägen ein Spanen mit kreisförmiger oder gerader, dem Werkzeug zugeordneter Schnittbewegung und (beliebiger) Vorschubbewegung in einer zur Schnittrichtung senkrechten Ebene zum Abtrennen oder Schlitzen von Werkstücken mit einem vielzahnigen Werkzeug von geringer Schnittbreite (DIN 8589-6).

In Abbildung 115 sind die verschiedenen Parameter der Zahngeometrie einer Säge dargestellt. In Abhängigkeit der Bauteile werden unterschiedliche Zahngeometrien und Materialien verwendet.

Abbildung 115: Parameter der Zahngeometrie einer Säge.



Quelle: Eigene Darstellung, Fraunhofer-ICT.

In Bezug auf deren Anwendungen und Geometrien werden die Sägen in unterschiedliche Unterklassifizierungen eingeteilt. Für die Zerlegung und die Demontage von Rotorblättern werden Sägemaschinen eingesetzt als handgeführte Maschinen oder hydraulisch angetriebene Baggeranbausägen. Sägen auf dem Markt, die für eine Demontage von Rotorblättern aus WEA geeignet sind, sind Diamantsägen oder Sägen mit Elementen aus Wolframcarbid. In Abhängigkeit von der Zahngeometrie handelt es sich um eine reversible Sägerichtung. Zusätzliche Elemente der Säge sind ein Sicherheitsschild, um beschleunigte abtransportierte Materialien einzufangen, und eine Möglichkeit, Wasser zu versprühen, um die Säge kontinuierlich zu kühlen und die Partikelemissionen in die Luft zu reduzieren. In Tabelle 45 sind exemplarisch die Spezifikationen einiger Modelle von Diamantsägen dargestellt. Entscheidende Parameter der Diamantsäge sind die Tiefe der Schnitte, das Gewicht des Baggers und die Leistung (Echidna 2021).

Tabelle 45: Diamantsäge und Modellspezifikationen.

Bagger (t)	Tiefe der Schnitte (mm)	Sägedurchmesser (mm)	Kontinuierliche Leistung (kW)
0,7 – 1,5	125 – 425	400 – 800	8
4 – 12	435 – 775	1000 – 1800	47
10 – 20	675 – 775	1000 – 2200	75
20 – 45	850 – 1600	2000 – 3500	470

Quelle: Echidna (2021).

Damit ein großes Rotorblatt vollständig geschnitten werden kann ohne dieses vom Platz bewegen oder drehen zu müssen, werden in Zukunft Sägen mit großen Durchmessern (Durchmesser bis 3500 mm) und einem entsprechenden Bagger (20 bis 45 t) notwendig sein.

Die heutige Technologie bietet nicht die Möglichkeit einer Veränderung der Schneidrichtung. Ein Schnitt kann nur auf einer Geraden liegen. Doch ist es möglich, mit dem Bagger die Säge zu steuern, mehrere Schnitte durchzuführen und entsprechend einzelne Elemente der Rotorblätter gezielt abzutrennen. Das Verfahren emittiert ca. 85 bis 113 dB (Greville 2019).

4.3.4 Hydraulische Scheren

Hydraulische Scheren nutzen eine hydraulische Kraft, um Material zwischen zwei Messern zu schneiden bzw. zu zerkleinern. Die hydraulisch angetriebenen Backen erzeugen einen sehr groben Schnitt durch das Material. Einem Bericht von Wind Europe zufolge sind hydraulische Scheren derzeit die gängigste Methode zum Schneiden von Onshore-Rotorblättern (WindEurope 2020). Wie auch bei den anderen Verfahren können die hydraulischen Scheren als Werkzeug an einen Bagger installiert oder als Handwerkzeug direkt bedient werden.

Die technische Grenze dieser Methode wird durch die Geometrie des Schneidewerkzeugs bestimmt. Eine stetige Zunahme des Durchmessers der Rotorblätter würde künftig unverhältnismäßig große Scheren/Backen erfordern, um das Blatt schneiden zu können. In Tabelle 46 sind exemplarisch die Abbruchzange der Firma ATN und die entsprechenden Spezifikationen dargestellt.

Tabelle 46: Abbruchzange und Modelspezifikationen.

Max. Maulöffnung, mm	670	760	830	965
Baggergewicht bei Montage am Löffelstiel t	38 – 50	50 – 65	65 – 90	90 – 110
Baggergewicht bei Montage am Ausleger t	26 – 38	38 – 45	40 – 60	60 – 80
Einsatzgewicht kg	4700	5750	7700	10100

Quelle: Nikolic (2012).

Ein weiterer Nachteil ist der unkontrollierte Austritt von Fasern sowie von großen losen Teilen, die beim Schneiden des Rotorblatts abreißen und abbrechen können. Dies stellt ein Risiko für Mensch und Umwelt dar und bedeutet verstärkte Emissionen. Staub- und Faseremissionen werden bei dem Verfahren nicht direkt gefangen, sondern lediglich mit einem Wassernebelsystem kombiniert (Jensen und Skelton 2018).

4.3.5 Unbemannte Demontagekammer

Die unbemannte Demontagekammer basiert auf dem Konzept, das Rotorblatt in Segmenten direkt von der WEA abzutrennen. Die unbemannte, umseitig geschlossene Sägezelle dieses Systems wird vom Boden gesteuert und bedarf keines Kraneinsatzes. Auf diese Weise reduzieren sich die Unfallgefahr für das Rückbaupersonal und die Umweltbelastung durch Glasfaserrückstände drastisch. Die kompakte Bauweise der Sägezelle und der flexible Abdruckrahmen des Rückbausystems ermöglichen einen kostengünstigen Transport mit einem 7,5 t LKW. Die Technologie ist direkt einsatzbereit, und es sind weder Kran noch ein zusätzlicher Schutz des Bodens erforderlich. Durch die Arbeit am hängenden Blatt entfallen Platzanforderungen an die Umgebung, und der Rückbau ist onshore als auch offshore effizient möglich (WP Systems 2021).

4.3.6 Alternative Demontageverfahren

4.3.6.1 Laserstrahlschneiden

Laserstrahlschneiden wird heutzutage in Fertigungsverfahren für FVK-Bauteile angewendet, wobei die FVK–Bauteile wenige mm Lagerdicke besitzen. Eine Anwendung bei großvolumigen und dicken FVK-Bauteilen wie Rotorblättern wurde im Rahmen dieser Studie nicht gefunden. Ein großer Vorteil des Laserschneidens ist die große Bandbreite an Materialien, die geschnitten

werden können. Während ein Laserstrahl auf das Werkstück fokussiert wird, um es zu erhitzen, wird ein zusätzliches Gas verwendet, um das erhitzte Material wegzublasen (Hechler 2019).

Das Sublimierschneiden kennzeichnet sich durch das Verdampfen beziehungsweise die Pyrolyse des erwärmten Werkstoffs und das sofortige Ausblasen der Dämpfe. Der hauptsächliche Wirkungsbereich liegt hierbei auf Werkstoffen (anorganische sowie organische) ohne ausgeprägten schmelzflüssigen Zustand. Der Werkstoff geht direkt vom festen in den gasförmigen Zustand über (Sublimation). Das Prozessgas (Luft oder Stickstoff) bläst nicht nur den Dampf aus der Schnittfuge, sondern verhindert hier auch dessen Kondensieren. Typische Werkstoffe sind beispielsweise Holz, Leder, Textilien, homogene und faserverstärkte Kunststoffe. Sublimierschnitte sind prinzipiell gratfrei, allerdings sind die entstehenden Gase oft brennbar. Um eine Dunkelfärbung der Schnittkanten bei Holz zu verringern, können verschiedene Techniken, wie Pulsen, Verwenden von sauerstoffhaltigem Blasgas (Luft), gute Fokussierung oder ein schneller Schnitt mit ausreichender Leistung eingesetzt werden. Um Materialien zu sublimieren, bei denen dies normalerweise nicht möglich ist, werden gepulste Laser hoher Spitzenleistung bei hoher Leistungsflussdichte eingesetzt. Der Plasmazustand tritt hierbei weitgehend sofort ein (wib-blechexperten 2021).

Beim Laserschneiden wird unsichtbare Laserstrahlung eingesetzt. Durch die hohe Leistung können gestreute und reflektierte Strahlanteile zu Haut- und Augenschäden führen (besonders bei Nd:YAG-Laser). Aus Sicherheitsgründen haben Lasermaschinen daher meist eine geschlossene Kabine, die nur im abgeschalteten Zustand geöffnet werden kann. Steigende Laserleistung und besonders die großen Fokusabstände der Faserlaser (Remoteschneiden) führen dazu, dass selbst dicke Betonplatten in wenigen Sekunden durchdrungen werden können. Die hieraus resultierende Gefahr kann mit sogenannten aktiven Umhausungen, die das Auftreffen eines Laserstrahls oder die beginnende Zerstörung erkennen und den Laser abschalten, reguliert werden. Das Material der Schnittfuge fällt bei Metallen als Aerosol an. Während bei hochlegierten Stählen die Legierungsbestandteile (Cobalt, Nickel, Chrom usw.) in Erscheinung treten, ist dies beim Schneiden von Baustahl nicht der Fall. Extrem gefährlich ist hingegen das Schneiden von Berylliumkupfer, halogenhaltigen organischen Materialien (PVC oder PTFE) oder von mit Flammschutzmitteln versehenen Materialien. Hierbei entstehen hoch giftige Gase (Dioxine und Furane) sowie stark korrosive Gase (Chlor-, Fluorwasserstoff). Gefahren des Laserschneidens sind also das Entstehen gesundheitsschädlicher Stoffe durch Pyrolyse organischer Materialien sowie die Brandgefahr durch den Laserstrahl und entstehende brennbare Gase (wib-blechexperten 2021).

Um die Brandgefahr zu senken durchläuft die Abluft von Laserstrahlschneidanlagen geschützte Filteranlagen (Partikelfilter, Kohlefilter) (wib-blechexperten 2021).

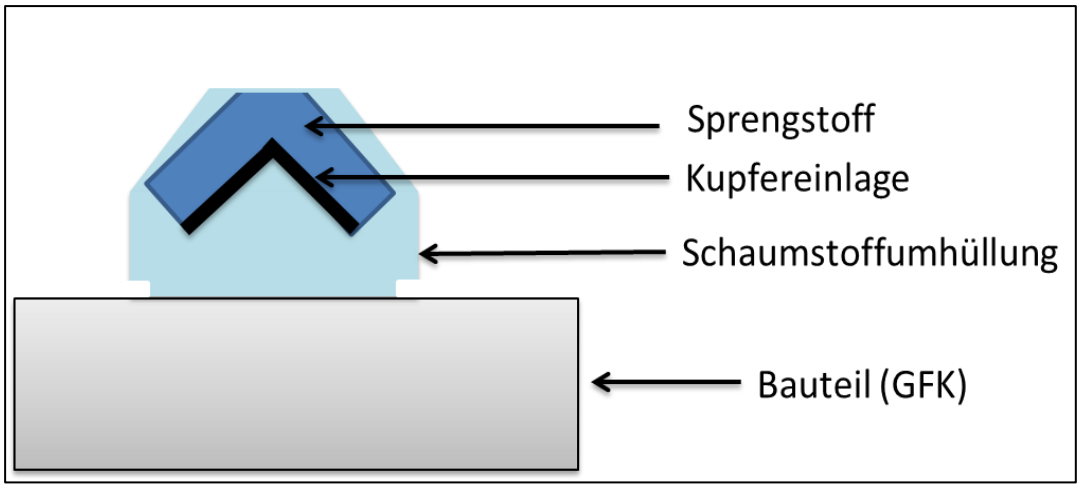
4.3.6.2 Energetische Demontage

Das Verfahren der energetischen Demontage wurde aus dem klassischen Abbruchverfahren adaptiert. Beim Abbruch hoher Bauwerke ist die Sprengtechnik unter ökonomischen und ökologischen Gesichtspunkten eine geeignete Methode. Der Abbruchvorgang wird auf einen Augenblick konzentriert und somit sind die Auswirkungen auf die Umgebung stark verkürzt und gut kontrollierbar (Seiler et al. 2016).

Die energetische Demontage von Rotorblättern ist das Trennen von Bauteilen mittels Sprengladungen (z. B. Schneidladungen). Der Einsatz von Schneidladungen im Abbruch wird bevorzugt, wenn der Einsatz von Maschinen unmöglich ist und/oder eine Gefährdung von Menschen durch die Trenntätigkeit besteht. Überwiegend werden Schneidladungen zum sprengtechnischen Abbruch von Stahlkonstruktionen oder Stahlbetonkonstruktionen eingesetzt, der Vorteil besteht in der klar definierten Schneidleistung und der exakten Schnittführung

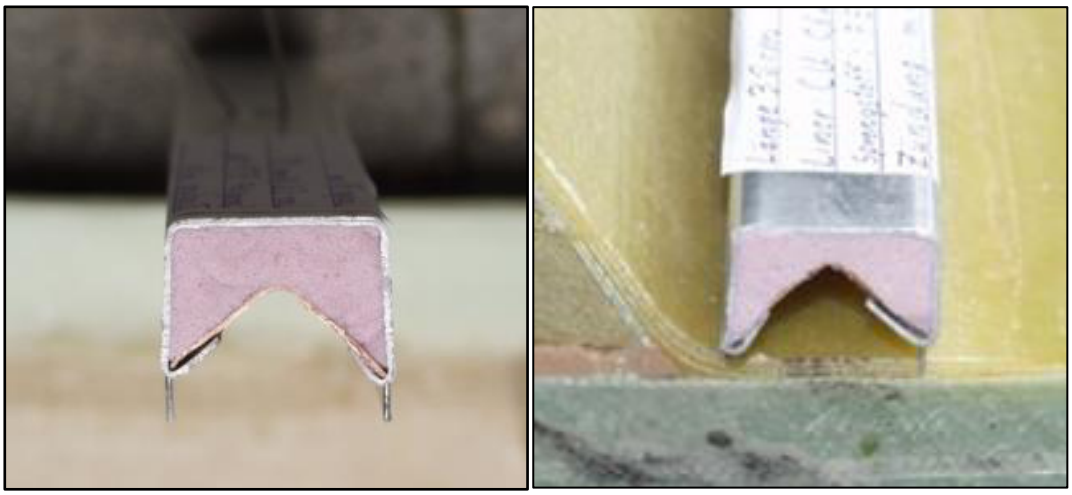
(Seiler et al. 2016). Bei einer Schneidladung wird der Sprengstoff auf einen V-förmigen Metallkörper (Liner), vorzugsweise Kupfer oder Blei, aufgebracht. Bei der Zündung des Sprengstoffs wird das Metall so stark beschleunigt, dass es eine Schneidebene bildet und das Material schneidet (Weber 2008). Der Aufbau einer Kupfer-Schneidladung ist in Abbildung 116 und Abbildung 117 dargestellt. Die jeweilige Lademenge an Sprengstoff hat einen wesentlichen Einfluss auf die Schneidleistung. Am Fraunhofer-ICT wurden im Vorfeld bereits Machbarkeitsversuche durchgeführt. Dabei wurden Rotorblattabschnitte mittels Sprengschnüren und Schneidladungen in Versuchen im Bunker und im Feldversuch demontiert.

Abbildung 116: Schematischer Aufbau einer Schneidladung.



Quelle: Eigene Darstellung, Fraunhofer-ICT.

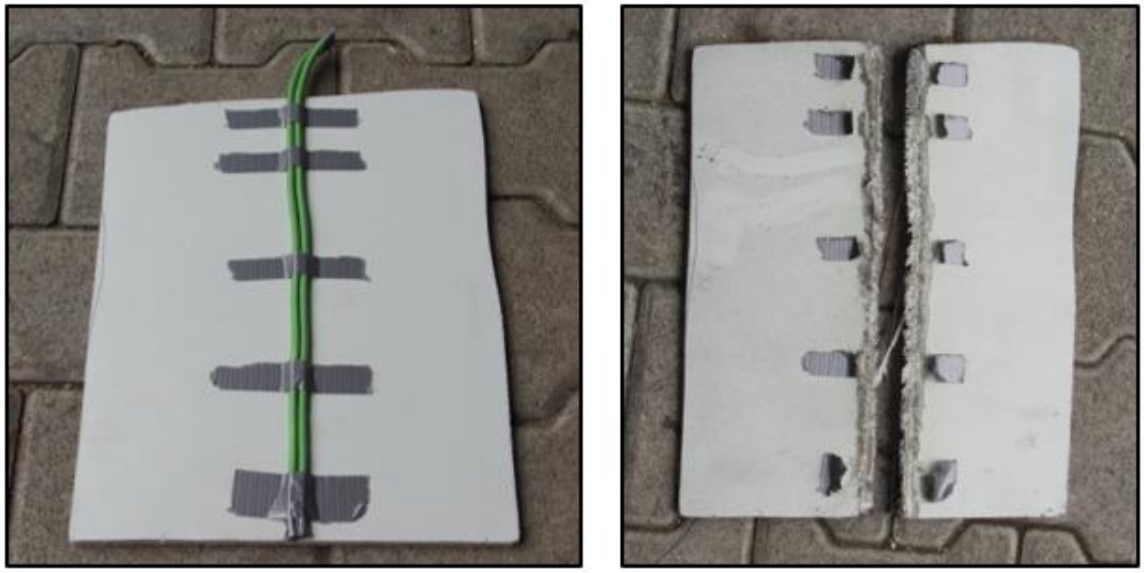
Abbildung 117: Am Fraunhofer-ICT hergestellte Schneidladung.



Quelle: Eigene Darstellung, Fraunhofer-ICT.

Die Versuche im Bunker mit handelsüblichen Sprengschnüren wurden an einem Rotorblattbauteil aus GFK-Kunststoffschaum mit einer Materialstärke von ca. 1,5 cm bis 2 cm durchgeführt. Die Sprengschnüre Nitropenta der Firma Dynamit Nobel AG wurden zweifach mit Klebeband am Bauteil befestigt (Abbildung 118 links) und anschließend im Bunker gezündet. Als Ergebnis ist in Abbildung 118 rechts eine Trennung entlang der Sprengschnüre zu erkennen, womit die Machbarkeit für Bauteile mit dieser Materialkombination und Stärke gezeigt wurde.

Abbildung 118: Trenneung eines Bauteils mittels Sprengschnüren. Links: Versuchsauafbau vor der Zündung. Rechts: getrenntes Bauteil nach dem Exoeriment.



Quelle: Eigene Darstellung, Fraunhofer-ICT.

In einem zweiten Versuch wurde als Bauteil der Gurtbereich aus GFK ohne Füllstoff ausgewählt. Die für die Versuche benötigte Schneidladung wurde am Fraunhofer-ICT ebenfalls mit Nitropenta und Kupfer als Liner angefertigt und am Bauteil mit Klebestreifen befestigt. Nach der Zündung im Bunker war das Bauteil zum einen entlang der Schneidladung und zum anderen entlang der Stegverklebung getrennt. Es war auch deutlich ein Ablösen einzelner GFK-Schichten zu erkennen, was auf die vom Sprengstoff ausgehende Stoßwelle zurückgeführt werden kann. In einem weiteren Versuch mit Balsaholz als Füllstoff konnten das teilweise Herauslösen von Balsaholz und die komplette Ablösung der umliegenden GFK-Schicht beobachtet werden.

Anhand dieser Versuche konnten die Machbarkeit zur Demontage von Rotorblättern mittels energetischer Demontage und die Separation der vorher als werthaltig definierten Bereiche dargestellt werden. Gegenstand der Forschung ist daraufhin die Abstimmung der Ladungsstärke des zu trennenden Materials, die Sprengstoffauswahl bzw. -entwicklung und die großtechnische Umsetzung unter besonderer Berücksichtigung der Umweltsicherheit (Seiler 2021).

Zur Durchführung von Sprengungen ist der Sprengunternehmer nach der dritten Verordnung zum Sprengstoffgesetz (3. SprengV) dazu verpflichtet, eine Sprenganzeige beim Gewerbeaufsichtsamt zu tätigen. Bei der Behörde müssen der Sachverhalt dargelegt und Angaben gemacht werden, z. B. Ort, Tag und Zeitraum der Sprengung und wie viel Sprengstoff eingesetzt wird. Weiterhin sind Angaben zu den Sicherungsmaßnahmen und zur Lage der Sprengstelle (Entfernung zu Verkehrswegen, Wohn- und Arbeitsstätten) vorzulegen (SprengV 1978).

Die Verantwortung für die Sprengung und die notwendigen Sicherheitsmaßnahmen wie Absperrung liegt beim Sprengunternehmer. Die in Deutschland vorhandenen Fachfirmen zur Sprengtechnik verfügen über modernste Technik und beachten bei der Durchführung höchste Sicherheitsanforderungen, um kontrollierte Sprengungen zu gewährleisten.

Die bei der energetischen Demontage möglichen Einwirkungen auf die Umwelt können Erschütterungen, Lärm, Staub und Partikelflug sein. In Folge des Sprengschlags, der von der detonierenden Ladung ausgehenden Stoßwelle, kann es zu Erschütterungen kommen, die über den Boden weitergeleitet werden können. Anders als beim Einsatz von Großgeräten können hier

jedoch die Erschütterungen exakt prognostiziert und durch regelmäßige Messungen überwacht werden. Überdies ist die beim Sprengschlag erzeugte Erschütterung überwiegend hochfrequent, wird im Boden stark gedämpft, und ist nach wenigen Metern (ca. 10 m) abgeklungen. [Eibl, Hermann 2000] Die Entwicklung von Lärm ist bei fachgerechten Sprengungen gering und meist ein dumpfes Grollen. Um den Lärm zu dämpfen, können der Zünder und die Sprengladungen mit Sand oder schalldämpfendem Material (z. B. Gummimatten) abgedeckt werden. Zur Bindung des entstehenden Staubs ist ebenso wie bei den anderen Verfahren eine Bewässerung notwendig. Eine Möglichkeit ist die „explosive Wasservernebelung“, wobei der Sprengstoff in einen kunststoffbeschichteten Textilgewebeschlauch eingezogen und anschließend mit Wasser gefüllt wird. Beim Zünden der Ladung wird so das Wasser feinst vernebelt und bindet den Staub. Im Abbruchbereich werden außerdem mit Wasser beladene Big-Bags eingesetzt, diese werden kurz nach der Detonation ebenfalls gesprengt und binden mit der entstehenden Wasserfontäne den Staub. Eine weitere Möglichkeit ist die Abdeckung des Sprengobjektes. Dabei werden z. B. Gummimatten, Filz- oder Vliesplanen auf das zu sprengende Objekt gelegt, und so Staub sowie durch die Stoßwelle freiwerdende Partikel gebunden.

4.4 Bewertung der Demontagetechnologien

Die Bewertung der Technologien erfolgte anhand der in 4.1.2 beschriebenen Kriterien auf Grundlage der Literaturrecherchen und durchgeführten Interviews. Die Bewertungen der einzelnen Kriterien sind in 4.1.3 genauer aufgeführt und in den folgenden Netzdiagrammen für die einzelnen Technologien aufgeführt, wobei die höchste Punktezahl (fünf) die beste Bewertung darstellt.

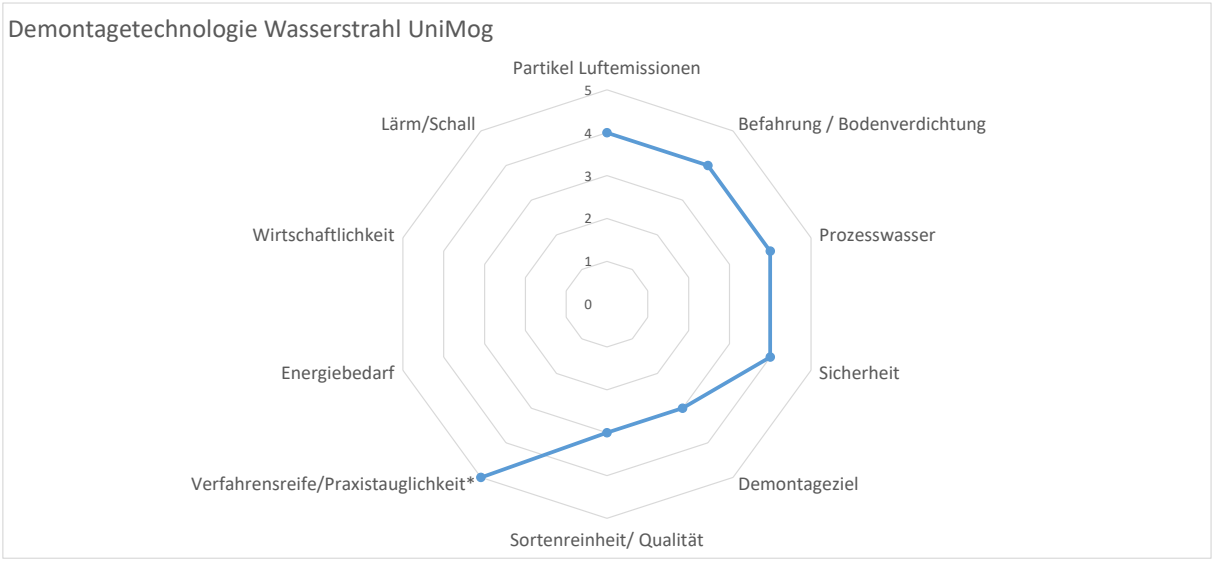
In den Kategorien von Lärm/Schall, Energiebedarf und Wirtschaftlichkeit konnten keine Angaben ermittelt werden, weshalb die Kategorien in den folgenden Darstellungen leer sind.

4.4.1 Wasserstrahlschneiden

Das Wasserstrahlschneiden von FVK zeichnet sich besonders durch seinen verschließarmen Betrieb aus und wird von zwei Firmen am Markt angeboten. Dabei unterscheiden sich die Ausführungen in der Prozesstechnik, welche vor Ort angewendet wird. Die Firma MATETEC schneidet Rotorblätter mit einer an einem Fahrzeug (UniMog) befestigten Lanze und die Firma Hanseatic Rohr hat eine automatisierte Schneidvorrichtung entwickelt.

In Abbildung 119 ist die Darstellung des Bewertungsergebnisses der Wasserstrahltechnologie von der Firma MATETEC abgebildet.

Abbildung 119: Bewertung Demontagetechnologie Wasserstrahl (Fa. MATETEC).



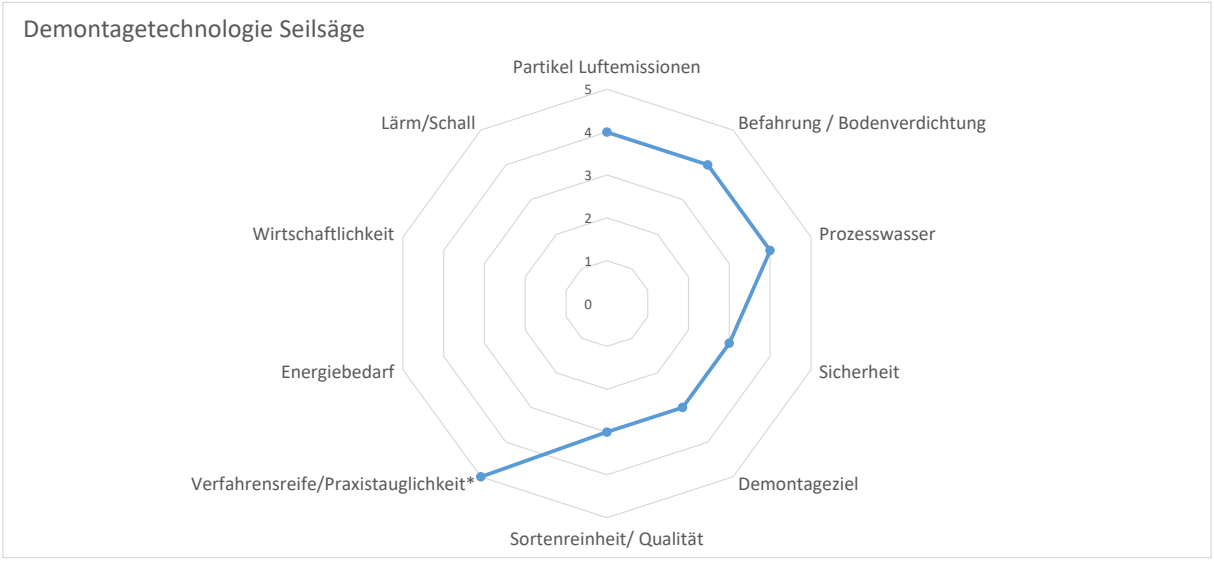
Quelle: Eigene Darstellung, Fraunhofer-ICT.

4.4.2 Seilsäge

Die Technologie der Seilsäge zur Demontage von Rotorblättern wird bei Rotorblättern schon lange angewendet,wurde von den Firmen CompoCycle und Veolia betrieben und vor Ort an Windenergieanlagen eingesetzt. In Abbildung 120 ist die Bewertung der Seilsägetechnologie dargestellt.

Im Vergleich zu der vorherigen Technologie des Wasserstrahlschneidens mit der Befestigung an einem UniMog existiert nur bei dem Kriterium der Sicherheit ein Unterschied, da bei dem Arbeiten mit der Seilsäge ein Umlegen des Seils erforderlich ist, während die Zerlegung mittels Wasserstrahl aus dem UniMog heraus erfolgen kann.

Abbildung 120: Bewertung Demontagetechnologie Seilsäge.

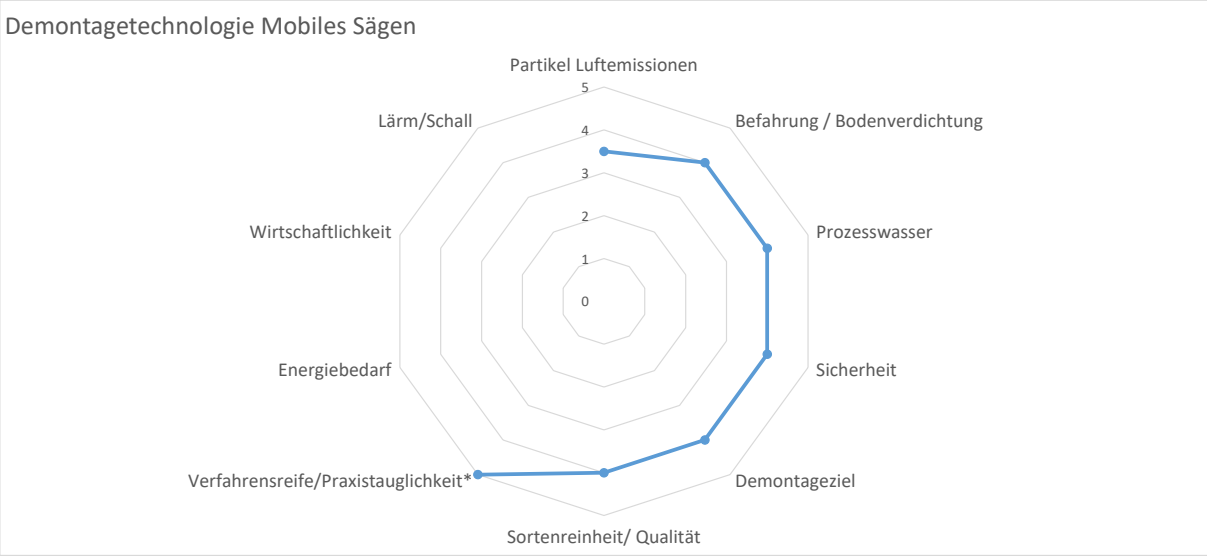


Quelle: Eigene Darstellung, Fraunhofer-ICT.

4.4.3 Mobile Sägen

Das Verfahren des Sägens ist aus dem Abbruchbereich bereits bekannt und wird auch für andere Elemente der WEA wie z. B. dem Turm anwendet. Die Firma Hagedorn, Gütersloh, bietet neben der kompletten WEA-Demontage auch die reine Demontage von Rotorblättern an und arbeitet dabei eng mit der Firma NeoComp GmbH, Bremen, zusammen, wodurch eine spätere Aufbereitung und Verwertung sichergestellt wird. Die Bewertung der Sägetechnologie ist in der nachfolgenden Abbildung 121 dargestellt.

Abbildung 121: Bewertung Demontagetechnologie Mobiles Sägen.

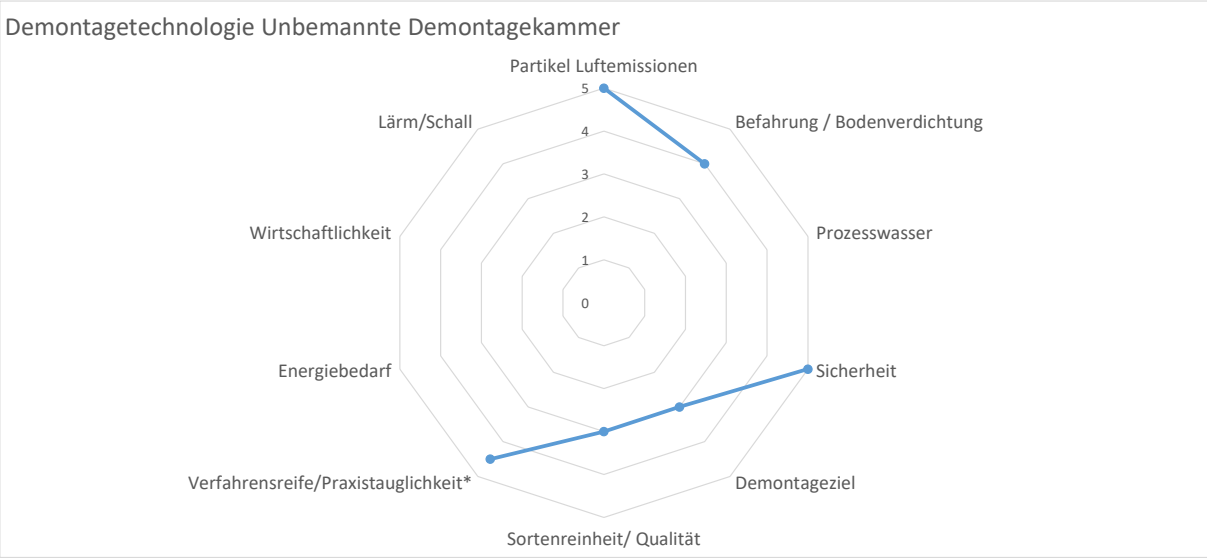


Quelle: Eigene Darstellung, Fraunhofer-ICT.

4.4.4 Unbemannte Demontagekammer

Das System der Demontagekammer hat auch das Prinzip des Sägens, jedoch ergänzt um ein System zum autonomen Handling am Rotorblatt ohne Einsatz eines Krans. Nach den vorliegenden Angaben konnte die nachfolgende Bewertung in Abbildung 122 erstellt werden. Zum Einsatz von Wasser für eine Bindung von Staub konnten keine Informationen gefunden werden. Im Vergleich zur Anbringung an einem Bagger fallen aufgrund der Konstruktion einer geschlossenen Kammer insbesondere die Partikel Luftemissionen und die Sicherheit besser aus.

Abbildung 122: Bewertung Demontagetechnologie unbemannte Demontagekammer.

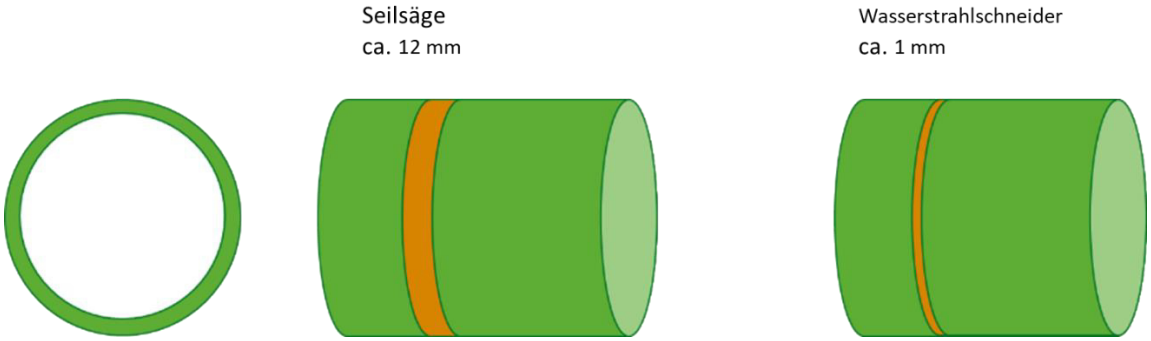


Quelle: Eigene Darstellung, Fraunhofer-ICT.

4.5 Partikel-Emission

In Hechler (2019) wurde die These aufgestellt, dass die Partikel, welche bei einem Schneidverfahren (Wasserstrahl Schneider, Drahtsäge, Säge) generiert werden, dem Volumen der Schnitte entsprechen. In Abbildung 123 sind schematisch die Schnitte von unterschiedlichen Schneidverfahren bei einem Zylinder aus GFK (Durchmesser 2 m, Wandstärke 20 cm) und das abtransportierte Material (orange) dargestellt.

Abbildung 123: Schematische Darstellung der Schnitte unterschiedlicher Schneidverfahren.



Quelle: Eigene Darstellung, Fraunhofer-ICT, nach Hechler (2019) und Knecht (2015).

In der rein rechnerischen Betrachtung von Hechler wurde veröffentlicht, dass bei einer Breite von 12 mm (z. B. eine Seilsäge) ca. 11 kg Partikel und bei einer Breite von 1 mm (z. B. Wasserstrahlschneider) ca. 0,9 kg Partikel generiert werden (Hechler 2019). Weiterführend Informationen zur Bewertung z. B. anhand von Partikelgrößenverteilung liegen zum jetzigen Zeitpunkt nicht vor.

Berechnet wurden nur die maximalen Mengen von dem Material, das abtransportiert wird. Nicht berücksichtigt bei der Berechnung wurden die Maßnahmen zur Bindung von abtransportierten Partikeln wie z. B. Wassernebel. In der Literatur sind keine Informationen zum Thema der quantitativen Emissionen in der Rotorblattzerlegung zu finden. Um die Emissionen zu begrenzen und die Partikel aufzufangen bevor diese die Umwelt kontaminieren, werden drei Lösungskonzepte angesetzt:

- System zur Benetzung mit Wasser (z. B. bei Wasserstrahlschneider und Säge),
- Systeme zur Absaugung der Partikel/ Emissionen,
- Kapselung/ Einhausung.

4.6 Zusammenfassung

Nach Beendigung der Nutzungsphase einer WEA muss die Anlage zurückgebaut werden, wobei die Angaben zur Lebensdauer variieren. Die Rotorblätter werden entweder einzeln oder am Stück mit der Nabe von der WEA abgenommen. Sobald die Rotorblätter am Boden liegen, kann ein Abtransport oder die Behandlung für eine Zerlegung beginnen. Einzig die von der Firma WP Systems GmbH angebotene Demontagelösung der unbemannten Demontagekammer würde eine Zerlegung der Rotorblätter an der WEA hängend erlauben, wodurch der Schritt der Abnahme entfällt.

Eine Zerlegung der Rotorblätter in kürzere Rotorblattstücke erfolgt in den meisten Fällen bereits vor Ort auf der Baustelle an der WEA, da ein Transport der Rotorblätter in kompletter Länge eine Genehmigung erfordert und so der logistische und wirtschaftliche Aufwand erhöht wird. Um eine optimale Verwertung der enthaltenen Materialfraktionen aus dem Rotorblatt gewährleisten zu können, ist eine Materialidentifikation vor der Rotorblattdemontage notwendig. Das kann über Herstellerangaben, zerstörungsfreie Prüfverfahren wie Thermografie oder durch Probebohrung oder Kameraaufnahmen aus dem Inneren des Rotorblatts erfolgen. Insbesondere das Vorhandensein von z.B. einem Gurt aus CFK bedarf einer genauen Abtrennung dieser Bereiche für die nachgeschaltete Verwertung der GFK Fraktionen. Dieser Schritt der Materialseparation kann vor Ort auf der Baustelle oder bei der Aufbereitung stattfinden.

Die abgenommenen Rotorblätter können nach der Identifikation der Materialien und Festlegung der notwendigen Stückgröße, z. B. 6 bis 12 m für einen genehmigungsfreien Transport, mittels unterschiedlicher Demontagetechnologien zerlegt werden. Dabei wird unterschieden in sägende Verfahren wie z. B. mittels Seilsägen, Mobilen Sägen an Baumaschinen, in Demontagekammern oder trennende Fertigungsverfahren wie dem Wasserstrahlschneiden. In der Forschung und Entwicklung wird z. B. die schnelle Zerlegung von Rotorblattmaterial mittels energetischer Materialien erforscht. Bei allen Verfahren müssen jedoch die Emissionen in die Umwelt, die Sicherheit im Umgang mit faserverstärkten Kunststoffen und die Verwertungsoptionen der Bauteile berücksichtigt werden.

In der von der Industrievereinigung für Repowering, Demontage und Recycling von Windenergieanlagen (RDRWind e.V.) veröffentlichten DIN SPEC 4866 werden Rahmenbedingungen für den gesamten Rückbau einer WEA festgelegt u. a. auch für Rotorblätter. Darin beschrieben und notwendige Sicherheitsmaßnahmen sind u. a. die Separation von GFK und CFK Anteilen, und die Anwendung von emissionsreduzierenden Verfahren, die ein Auffangen des Sägemehls ermöglichen für eine anschließende fachgerechte Entsorgung.

Bei keinem der in der Studie untersuchten Verfahren zur Demontage vor Ort an der WEA kann eine Freisetzung von Partikeln in die Umwelt vollständig und nachweisbar unterbunden werden. Daher gilt die Empfehlung so wenig Schnitte wie möglich vor Ort an der WEA vorzunehmen. Sollte CFK Material enthalten sein, ist dieses wenn möglich von dem GFK Material abzutrennen für eine Verwertung in der Zementroute.

Nach der Betrachtung der Demontageverfahren und in Anlehnung an die DIN SPEC 4866 sind Sicherheitsmaßnahmen notwendig, um den Eintrag von schädlichen Stoffen in die Umwelt zu unterbinden:

- Vor Ort an der WEA ist eine Absaugung oder Bewässerung mit Wasserfiltration zur Vermeidung der Exposition von Schadstoffen in die Umwelt zwingend vorzuschreiben.
- Eine Einhausung der Demontagetechnologien wird empfohlen, um die Emissionen vollständig zu binden.
- Zur weiteren Verringerung der Staubemissionen sollten so wenig Schnitte wie nötig vor Ort geschehen.

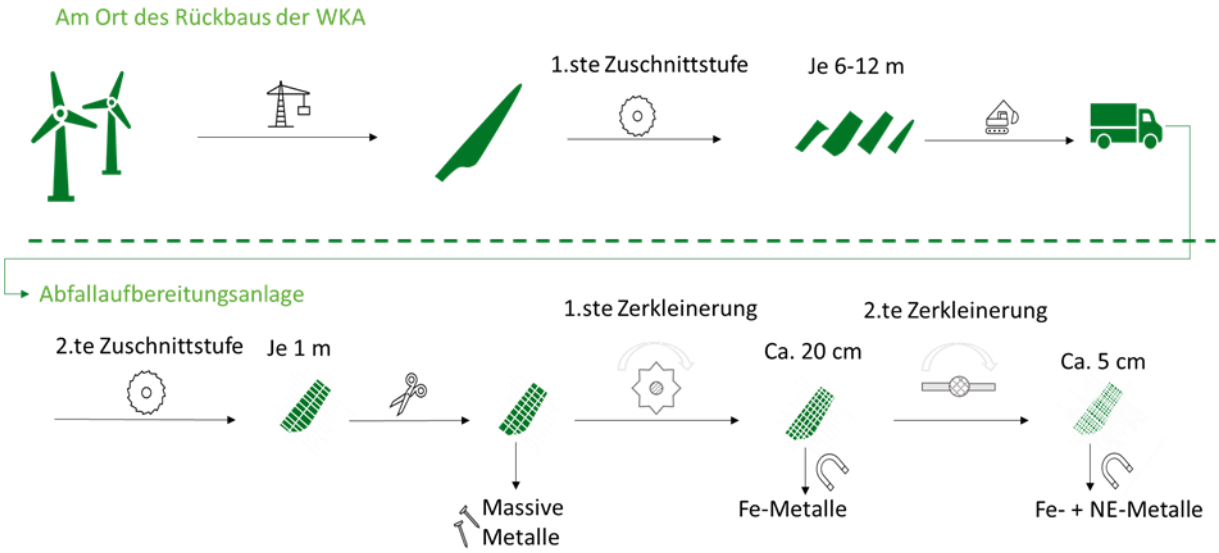
Neben den oben genannten technischen Sicherheitsmaßnahmen besteht auch in der Analytik Handlungsbedarf. Zur genauen Prozessbewertung sind standardisierte Vorgaben z. B. quantitative Parameter für die Bewertung der Emissionsfreisetzung. Insofern eine einheitliche Vorgehensweise z. B. in der Bestimmung der freiwerdenden Partikel vorliegt, können Behörden bei der Genehmigung für die Demontage vor Ort transparente Vorgaben machen. Hierbei besteht weiterhin ein Forschungsbedarf hinsichtlich der Partikelemissionen in Abhängigkeit von dem Material, der Technologie und der Staubbindungsmaßnahmen.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass bereits bei dem ersten Schritt in der Verwertungskette, der baustellenseitigen Abfallbehandlung, eine große Abhängigkeit der jeweiligen Materialzusammensetzung, der Demontagetechnologien und den jeweiligen Verwertungsszenarien der Fraktionen vorliegt. Für eine ganzheitliche hochwertige Verwertung müssen die Aufbereitungsschritte in Ihrer Gesamtheit betrachtet und die aufgeführten Lücken in der Bewertung geschlossen werden.

5 Aufbereitung von Rotorblattabfällen

Rotorblattabfälle müssen nach einer baustellenseitigen Zerlegung, die in einer ersten Zuschnittstufe (Segementierung) in transportfähige Teilstücke von ca. 6 bis 12 m vor Ort erfolgt, weiter aufbereitet werden. Diese Aufbereitung kann lokal bei einem Entsorgungsfachbetrieb durchgeführt werden, der über eine abfallrechtliche Genehmigung für die Aufbereitung des Abfallstroms verfügt, insbesondere für die Verarbeitung von FVW. Beispielhaft ist dieser Vorgang der baustellenseitigen Demontage und Zerlegung der Rotorblätter sowie die nachträgliche Zerkleinerung bei einer Abfallaufbereitungsanlage in Abbildung 124 dargestellt.

Abbildung 124: Fließschema der Rotorblattdemontage und Aufbereitung von Rotorblättern.



Quelle: Eigene Zusammenstellung, Fraunhofer-ICT.

Vor der Zerkleinerung der Rotorblattelemente beim Entsorgungsfachbetrieb müssen diese in kleinere Teilstücke (2. Zuschnittstufe) zerlegt werden, damit danach eine Abtrennung von Metallen sowie Elektro- und Elektronikkomponenten erfolgen kann. Hierzu sind Informationen zum spezifischen Aufbau des Rotorblatts zweckmäßig, damit Menge, Ort und Art der jeweiligen Materialien für eine zielgerichtete Aufbereitung bekannt sind. Bezüglich des Stahls (Fe-Metalle) sind besonders die massiven Rotorblattbefestigungskomponenten zu entfernen. Unwuchtmassen können vorhanden sein, die sich entweder als Epoxid-, Stahl- oder Bleischrot in eigens dafür konstruierten Schrotkammern in den Rotorblättern befinden (Albers et al. 2021b), wobei Ort und Menge aus dem Rotorblattaufbau bekannt sein sollten, um Schadstoffe wie Blei gezielt zu entfernen und dem Bleirecycling zuzuführen.

Der Stahlanteil, maßgeblich aus den Befestigungselementen, liegt massenbezogen bei ca. 3 %, der Kupferanteil aus vorrangig Blitzschutzeinrichtungen bei unter 1 %, und der CFK-Anteil kann zwischen 0 und 15 % variieren. Kunststoffschäume können bis zu 5 % und Balsaholz bis zu 8 % ausmachen. Der Massenanteil sonstiger Materialien und Komponenten der Abtrennung liegt in der Regel unter 1 %. Die nach dieser Zerteilung und Abtrennung vorliegenden Rotorblattabfälle bestehen maßgeblich aus GFK, mit Anteilen von Schäumen, Balsaholz sowie Lacken, Beschichtungen und Klebern, deren Anteile je nach Rotorblattkonstruktion variieren (vgl. Abschnitt 2.2.3.5 und (Albers et al. 2021b).

Eine weitere Aufbereitung dieses verbleibenden Materialverbunds ist aufwändig und weitere Fraktionen sollten möglichst sortenrein abgetrennt und aufbereitet werden, wobei auch für

sortenreine Fraktionen zum Teil geeignete Verwertungsprozesse fehlen. Für eine sortenreine Verwertung von Schäumen bzw. Lacken stehen keine kommerziell verfügbaren Verwertungsverfahren zur Verfügung. Eine weitere sortenreine Aufbereitung wäre nur dann zweck- und verhältnismäßig, falls diese Stoffe im restlichen Materialverbund bei deren Verwertung als Störstoffanteil den Verwertungsprozess oder daraus gewonnene Produkte negativ beeinflussen würden. Dies könnte zum Beispiel für Titandioxid als Weißpigment in Lacken und Beschichtungen der Fall sein, wenn dieser Störstoff bei der Aufbereitung bzw. der Verwertung freigesetzt oder in Produkte anreichert wird.

5.1 Bewertungskriterien

Die betrachteten Aufbereitungsprozesse werden hinsichtlich einheitlicher technologischer und wirtschaftlicher Kriterien beurteilt. Diese Kriterien umfassen die Verfahrensreife von Prozessen, die erreichbaren Durchsätze, den spezifischen Energiebedarf, den Verschleiß und die damit einhergehenden Instandhaltungsaufwände, die Aufbereitungsmethode, die für die Verwertung notwendigen Produktkriterien sowie weitere technische Aufbereitungsziele, insbesondere die Flexibilität von verfügbaren Zerkleinerungsapparaten sowie Materialverluste in den Aufbereitungsprozessen (Tabelle 47).

Tabelle 47: Technologische und wirtschaftliche Kriterien zur Beurteilung von Aufbereitungsprozessen.

Bewertungskriterium	Beschreibung
Technology Readiness Level (TRL)	Reifegrad einer Technologie oder Maschine, eines Verfahrens oder Prozesses
Durchsatz	Wird durch den Massenstrom bestimmt
Spezifischer Energiebedarf	Der Energiebedarf, der maschinenspezifisch aus Leerlaufleistung und Zerkleinerungsarbeit errechnet wird, bezogen auf den Massenstrom
Verschleiß	Abrasivität, Instandhaltungsaufwand, etc.
Aufbereitungsverfahren	Kombination aus trockener/nasser Aufbereitung und/oder Kombination mit chemischen Zusätzen
Produktkriterien	Die Produktkriterien beinhalten Störstoffanteile und Dimensionen der Aufbereitungsprodukte
Wirtschaftlichkeit	Kosten des Aufbereitungsprozesses
Technische Aufbereitungsziele	Flexibilität + Technische Möglichkeiten zur Erreichung des Aufbereitungsziels. Angabe einer theoretischen Recyclingquote bzw. die erwartbaren Materialverluste

Quelle: Eigene Zusammenstellung, Fraunhofer-ICT.

5.1.1 Technology Readiness Level (TRL)

Der TRL gibt die Verfahrensreife eines Prozesses an mit den Stufen 1 bis 9, wobei Stufe 1 dem Nachweis eines Grundprinzips und Stufe 9 dem kommerziellen wettbewerbstauglichen Betrieb entspricht. In Kapitel 6.1.1 wird die Einteilung nach TRL mit den jeweiligen Stufen erläutert.

5.1.2 Durchsatz

Der Durchsatz wird als die Masse pro Zeiteinheit definiert und ist abhängig von der Apparategröße, der Dichte des Materials und der spezifischen Zerkleinerungsarbeit. Beispielsweise können Schaumstoffanteile aufgrund des größeren Volumens geringere massenbezogene Durchsätze im Vergleich zu reinem GFK mit höherer Dichte erreichen (Hedlund-Åström 2005).

5.1.3 Spezifischer Energiebedarf

Der spezifische Energiebedarf ergibt sich aus dem Durchsatz und berechnet sich aus dem Energiebedarf eines Apparats in MJ bezogen auf ein Kilogramm zerkleinertes Material (vgl. Kapitel 5.2.1). Wenn kein spezifischer Energiebedarf in der Literatur zu finden ist, kann eine Abschätzung über die elektrische Motorleistung erfolgen. Diese Angaben werden zu den jeweiligen Zerkleinerungsapparaten vermerkt.

5.1.4 Verschleiß

Der Verschleiß der Zerkleinerungswerkzeuge, z. B. durch eine Abstumpfung von Schneiden oder den materiellen Abtrag von Schlagkörpern oder Prallplatten, ist abhängig von dem Aufbau und den verwendeten Materialien des Zerkleinerungsapparats sowie dem zu zerkleinernden Material. Es erfolgt eine qualitative Bewertung in die Kategorien hoher, mittlerer und niedriger Verschleiß. Die gleiche qualitative Einteilung gilt auch für den geschätzten Instandhaltungsaufwand der jeweiligen Apparate.

5.1.5 Aufbereitungsverfahren

Die Aufbereitung ist je nach Ausführung nass oder trocken möglich und es wird abgefragt, ob beispielsweise eine kryogene Zerkleinerung erfolgt oder weitere Lösemittel zugegeben werden. Bei einer kryogenen Zerkleinerung wird flüssiger Stickstoff als Kühlmittel verwendet, um das Aufgabegut zu verspröden.

5.1.6 Produktkriterien und Störstoffanteile

Die Reinheit der Fraktionen nach dem Aufbereitungsprozess ist ein entscheidendes Bewertungskriterium für den Erfolg des Aufschlusses des Materialverbundes. Die Reinheit nach der Zerkleinerung ist zuallererst vom Aufschlussgrad abhängig: Ein massenbezogener Aufschlussgrad von 100 % bedeutet einen vollständigen Aufschluss des Materialverbundes. Ein weiteres Produktkriterium sind die erwartbaren bzw. maximal erreichbaren Produktgrößen der Fraktionen für die weitere Verwertung. Die nach der Zerkleinerung und Sortierung vorliegenden Outputströme der Stofffraktionen eines Rotorblatts spielen für die wirtschaftliche Bewertung eine wichtige Rolle. Dadurch kann eine Abschätzung erfolgen, wieviel der einzelnen Materialien maximal pro Rotorblatt verwertet werden können.

Die notwendige Reinheit der Fraktionen ist verwertungsabhängig und wird deshalb, wie in Tabelle 48 gezeigt, nach Aufbereitungsrouten unterschieden.

Tabelle 48: Produktkriterien von Stoffströmen für die Verwertungsrouten.

Route	Verwertungsmaterial	Störstoffe	Maximal möglicher Störstoffanteil als Massenprozent [%]	Maximale Produktgrößen [mm]	Massenanteil eines Rotorblatts [%]
Zementroute	GFK + Rest	Metalle; CFK	~0; 0	< 50	~81 – 96
Mechanisches Recycling	GFK	Metalle, Balsaholz, Schäume	~0	z. B. < 0,1	~0 – 75
Carbid-Route	CFK	GFK; Metalle; PVC-Schäume	~0; 0; 0	< 50	~0 – 19
Konventionelle Pyrolyse	CFK	GFK	0	Ca. < 1000 Länge, Ca. 200 in Höhe	~0 – 19

Quelle: Eigene Zusammenstellung, Fraunhofer-ICT.

Aus Tabelle 48 wird ersichtlich, dass Metalle als Prozessstörstoffe bei allen betrachteten Verwertungsrouten, außer der Pyrolyse, ausgeschleust werden müssen. Die Notwendigkeit der Metallseparation hat durchaus auch wirtschaftliche Vorteile für den Verwerter, da ein Altmetallmarkt besteht. Die maximalen Produktgrößen beziehen sich auf die notwendigen Dimensionen für die weitere Verwertung entlang der in Tabelle 48 genannten Verwertungsrouten. Die maximalen Produktgrößen im Rahmen der Pyrolyse richten sich nach den Abmessungen der Pyrolyseschächte und liegen im Falle von Gen 2 Carbon Ltd. aus Großbritannien nach dem Patent von Davidson und Price (2009a) bei einer maximalen Länge von ca. 1 m und einer Höhe von ca. 20 cm. Der mengenmäßig größte Anteil verwertbarer Materialien an Rotorblattabfällen in den gezeigten Routen, geht mit ca. 81 bis 96 Ma-% als Co-Processing ins Zementwerk. Nach der Aufbereitungsroute des mechanischen Recyclings zur Füllstoffherstellung kann maximal bis 75 % des Rotoblattabfallmaterials verwertet werden. Für die Carbidroute kommt CFK mit einem Anteil von 0 bis15 % in Frage. Gleiches gilt für die CFK-Aufbereitung mittels Pyrolyse (vgl. Abschnitt 2.2.3.5 und Albers et al. (2021a)).

5.1.7 Wirtschaftlichkeit

Die Wirtschaftlichkeit ist nicht nur im Rahmen der Demontage (Kapitel 4.2), sondern auch im Rahmen der Aufbereitung von Rotorblättern ein wichtiges Kriterium. Die Wirtschaftlichkeit der Aufbereitungswege korreliert insbesondere mit dem Technologiereifegrad und dem Durchsatz. Die Auswahl der Zerkleinerungs-, Klassier- und Sortiertechniken erfolgt auf Grundlage der Verwertungstechnologie, der Materialmengen und -dimensionen sowie der Qualitätskriterien für Rezyklate, wobei auch der Transportweg ein Kostenfaktor darstellt. Alle diese Faktoren geben die Kosten für die Aufbereitung und damit der Wirtschaftlichkeit der betrachteten Technik vor. Die Kosten werden auf Grundlage von Gebühren sowie Erlösen aus den Rezyklaten und den sortierten Stoffströmen bestimmt.

5.1.8 Aufbereitungsziele

Im Rahmen der Zerkleinerung und Aufbereitung von Rotorblättern zur Vorbereitung für nachfolgende Verwertungsprozesse stehen folgende Ziele im Vordergrund:

- Herstellung der Transportfähigkeit
- Aufschluss des Materialverbunds
- Volumenreduzierung
- Herstellung einer definierten Partikelgrößenverteilung
- Separierung in stoffreine Fraktionen
- Erzeugung eines fließfähigen Schüttguts.

Insgesamt sollte ein Zerkleinerungsapparat robust und flexibel sein, um die anfallenden Rotorblattabfälle zerkleinern zu können.

5.2 Beschreibung der Aufbereitungstechnik

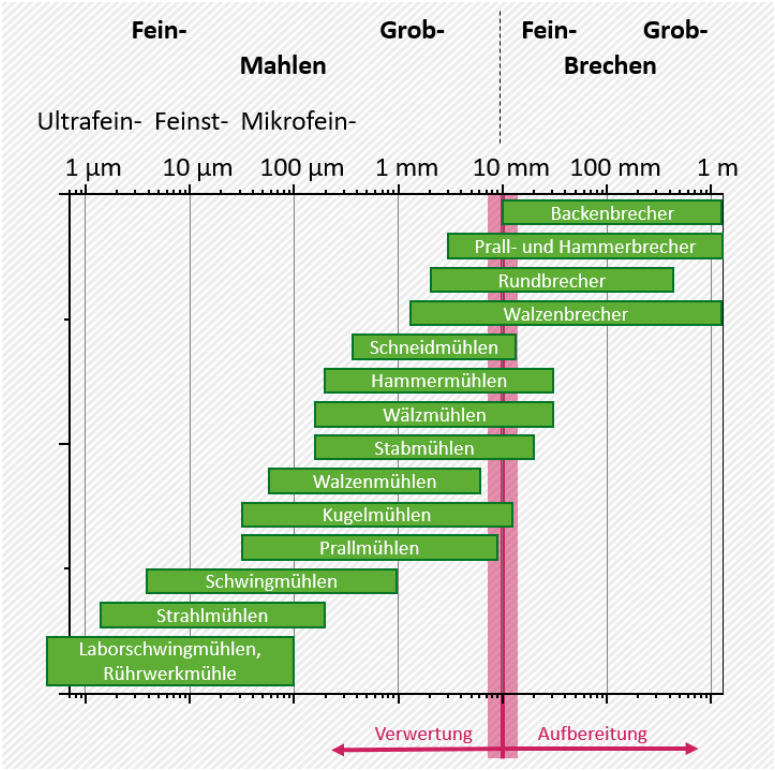
Die Aufbereitung von Rotorblattabfällen ist abhängig vom Verwertungsprozess. Allgemein bedingt jeder Verwertungsprozess einen entsprechend vorzerkleinerten Abfallstrom, dessen Größe von diesem abhängt. Zum Beispiel muss für eine rein mechanische Faserverwertung des GFK eine Zerkleinerung bis in den Bereich von 100 µm erfolgen. Da Rotorblätter eine Länge bis zu 100 m besitzen, wird für eine rein mechanische Verwertung, von der baustellenseitigen Abfallbehandlung, über die Aufbereitung der Rotorblattabfälle bei einem lokalen Entsorgungsfachbetrieb, bis hin zur Verwertung als Füllstoffersatzmaterial, eine Zerkleinerung um 6 Zehnerpotenten benötigt, die in mehreren Zerkleinerungsschritten mit Klassierungen in einer Reihenschaltung erfolgen müsste.

5.2.1 Grundlagen der Zerkleinerungstechnik von Feststoffen

Zerkleinerungsapparate werden nach ihrem Dispersitätsbereich, ihrem Einsatzgebiet bezüglich der Material- und Brucheigenschaften, der Hauptbeanspruchungsart sowie ihrem Leistungsbereich klassifiziert, wobei es durchaus Überschneidungen und Grenzfälle gibt.

Bezüglich des Dispersitätsbereichs wird zwischen „Brechen“ für die Grobzerkleinerung (Aufgabegröße > 10 mm) und „Mahlen“ für die Feinzerkleinerung (Aufgabegröße < 10 mm) unterschieden (Abbildung 125). Der Übergang ist fließend, sodass Feinbrecher und Grobmühlen auch im selben Dispersitätsbereich arbeiten können. Grundsätzlich lässt sich feststellen, dass für die Grobzerkleinerung große Kontaktflächen notwendig sind, was zu relativ geringer spezifischer Zerkleinerungsarbeit führt, wobei es sich bei der Feinzerkleinerung umgekehrt verhält (Schubert 2008). Die beiden Dispersitätsbereiche werden jeweils in „Grob“ und „Fein“ unterteilt, wobei der Feinbereich des Mahlens weiterhin in die Kategorien „Mikrofein“, „Feinst“ und „Ultrafein“ untergliedert ist (Stieß 2001).

Abbildung 125: Einteilung von Zerkleinerungsapparaten nach dem Dispersitätsbereich des Aufgabeguts.



Quelle: Eigene Darstellung, KIT-ITC, nach Stieß (2001).

Die Grenzen zwischen Aufbereitung und Verwertung sind fließend und abhängig von den Aufgabegrößen und den über den Zerkleinerungsgrad erhaltenden Endkorngrößen. Liegt das Ziel in sehr feinem Material, so handelt es sich um einen mechanischen Verwertungsprozess (Partikelrecycling), zum Beispiel der Erzeugung eines faserhaltigen Füllstoffersatzmaterials.

Die Einteilung von Zerkleinerungsapparaten nach ihrem Einsatzgebiet bezüglich der Materialeigenschaften des Mahlguts erfolgt über die Mohs-Härte, wobei zwischen Hartzerkleinerung-, Mittelhart- und Weichzerkleinerung unterschieden wird (Tabelle 49).

Tabelle 49: Einteilung von Zerkleinerungsapparaten nach ihrem Einsatzgebiet bezüglich der Materialeigenschaften.

	Hartzerkleinerung	Mittelhartzerkleinerung	Weichzerkleinerung
Mohs-Härte:	6 - 10	2 - 5	1 - 2
Beispiele:	Quarz, Zementklinker, Basalt, Kiesel, harte Erze	Kohle, Kalk, Salze, Gips	Kreide, Talk, Kunststoffe, Gummi, Wachs

Quelle: Eigene Zusammenstellung, KIT-ITC, nach Stieß (2001) und Zogg (1993).

Die Einteilung von Zerkleinerungsapparaten nach der Beanspruchungsart erfolgt nach Rumpf (1975) in folgende vier Kategorien: Beanspruchung des Mahlguts zwischen Zerkleinerungswerkzeugen, Beanspruchung an einem Zerkleinerungswerkzeug (Prallbeanspruchung), Beanspruchung durch das umgebende Medium, und Beanspruchung durch eine nichtmechanische Energiezufuhr.

Die Beanspruchung zwischen Zerkleinerungswerkzeugen erfolgt über Druck-, Schub-, Schlag- oder Schneidbeanspruchung und ist dadurch gekennzeichnet, dass die Beanspruchungsintensität unabhängig von der Beanspruchungsgeschwindigkeit ist und damit auch bei relativ geringer Beanspruchungsgeschwindigkeit eine erzwungene Verformung des Materials bewirkt. Bei der Prallbeanspruchung liegen im Allgemeinen sehr hohe Beanspruchungsgeschwindigkeiten vor, und die Beanspruchungsintensität ist von der Bewegungsgeschwindigkeit des Mahlguts und des Werkzeugs abhängig. Bei der Beanspruchung durch ein umgebendes Fluid erfolgt die Energiezufuhr durch Scherströmung, Druckwellen oder Kavitation. Hierbei ist die Energiezufuhr geringer als bei den vorgenannten Beanspruchungsarten, weshalb sich diese Beanspruchungsart zum Beispiel nur für eine Dispergierung bzw. Zerteilung von Agglomeraten eignet. Bei der Beanspruchung durch eine nichtmechanische Energiezufuhr kann diese elektrisch, thermisch oder chemisch erfolgen.

Daneben wird zwischen Einzelkorn-, Mehrkorn- und Gutbett-Beanspruchung unterschieden. Die Einzelkorn-Zerkleinerung weist die höchste Energieausnutzung auf und dient als Bezugsmaß für die Effektivität maschineller Zerkleinerung. Die Einzelkorn-Zerkleinerung begünstigt große Partikel und findet vorwiegend Einsatz in Backen-, Walzen- und Rundbrechern sowie in den meisten Prallzerkleinerern. Bei der Mehrkorn-Beanspruchung wird die Zerkleinerungsenergie gleichzeitig an vielen Kontaktstellen eingeleitet, was den Energiebedarf reduziert und auf Walzenmühlen und Rundbrechern zutrifft. Wird die Zerkleinerungsenergie auf das gesamte Mahlgut übertragen, wird dies als Gutbett-Beanspruchung bezeichnet. Dabei ist die Energieausnutzung umso schlechter, je höher der Feingutanteil ist, da kleine Partikel die zu zerkleinernden größeren Partikel umhüllen und sich dadurch Kontaktkräfte über eine größere Oberfläche verteilen. Bei Überschreiten eines kritischen Pressdrucks kann es zur Pressagglomeration kommen (Stieß 2001).

Der Energiebedarf einer mechanischen Zerkleinerung eines Feststoffs setzt sich aus dem Energiebedarf für die Stromversorgung des Apparateantriebs (Grundleistung) P_0t und der materialspezifischen Zerkleinerungsenergie kQt, d. h. der Verformung des Aufgabematerials, der Reibung und der Materialabtrennung an der Werkzeugspitze, gemäß folgender Gleichung zusammen:

$$E = (P_0 + kQ)t$$

Dabei ist E der gesamte Energiebedarf, P_0 die Grundleistung des Zerkleinerungsapparats ohne Zerkleinerungsoperation in J, k der spezifische Energiekoeffizient für das Schneiden eines bestimmten Materials in J/mm^3, Q die Materialabtragsvolumenrate in mm^3/s, und t die Bearbeitungszeit in s (Shuaib und Mativenga 2016b; Howarth et al. 2014).

5.2.2 Zerkleinerungsapparate für FVW

Die FVW in Rotorblättern bestehen meist aus duroplastischem Kunststoff mit spröde brechenden und abrasiv wirkenden Verstärkungsfasern. Somit kommen unterschiedliche, aber bei weitem nicht alle Verfahren für die Zerkleinerung dieser Materialien in Frage. Sprödes GFK bzw. CFK kann entweder über eine äußere langsame Beanspruchung (0,1 bis 5 m/s), z. B. beim Scheren oder Schneiden mittels Einwellen- und Mehrwellenzerkleinerer (EWZ/MWZ), oder schnellaufende Druckbeanspruchung (> 5 m/s), z. B. durch Prall und Schlag mittels Hammer- und Prallmühlen, zerkleinert werden (Nickel 1996).

Tabelle 50: Einteilung der Zerkleinerungsapparate nach Beanspruchungsart für FVK.

Zerkleinerungsapparat	Hauptbeanspruchungsart
Backenbrecher	Druck
Ein-/Mehr-Wellenzerkleinerer (Walzenbrecher, Schredder)	Druck, Scherung, Reißen, Schneiden
Prall-/Hammerbrecher	Prall, Schlag
Querstromzerspaner (QSZ)	Prall, Schlag
Prallmühle, Hammermühle	Prall, Schlag
Schneidmühle	Schneiden
Kugelmühle	Prall, Reibung, Druck, Schlag

Quelle: Eigene Zusammenstellung, Fraunhofer-ICT, modifiziert nach Martens und Goldmann (2016).

5.2.2.1 Backenbrecher

Die Eingabe erfolgt über einen trichterförmigen Einlass mit einer festen Beanspruchungswand und einer gegenüberliegenden sich exzentrisch bewegenden Brechbacke. Das Aufgabegut wird zwischendrin über Einstellung eines unteren Spalts über Druck zerkleinert. Diese Apparate finden Einsatz für die Aufbereitung von Mineralstoffen, Guss-Schrotten, Bauschutt und Schlacken (Martens und Goldmann 2016).

Die Form und Dicke von Rotorblättern, die im Querschnitt variieren kann, ist maßgeblich für das Zerkleinerungsverfahren. Es gibt bisher keine Informationen ob Rotorblattabfälle bereits mit Backenbrechern vollständig zerkleinert wurden. Es existieren mobile Aggregate, und es wird in der Literatur von einem geringen Verschleiß der Platten ausgegangen. Aufgrund von maximalen Aufgabegrößen von bis zu 2 m (Zogg 1993) ist eine Eignung als erste Zerkleinerungsstufe mit Rotorblattabfall denkbar. Dagegen sprechen jedoch die nicht ideal runde Kornform und die eher flächig aufbrechenden FVW die je nach Spaltweite durchrutschen könnten.

5.2.2.2 Ein- / Mehrwellenzerkleinerer

Die Zerkleinerung in Ein- (EWZ)/Mehrwellenzerkleinerern (MWZ) erfolgt durch Zerkleinerungsprofile unterschiedlicher Geometrien, die an einer oder mehrlaufigen Welle angebracht sind, um das Aufgabematerial hauptsächlich über Druck und Scherung zu zerkleinern. Es wird zwischen Axialspalt- und Radialspalt-Rotorscheren unterschieden. Bei den einwelligen Typen wird das Aufbereitungsgut meist über einen an die Werkzeuggeometrie angepassten Amboß zerkleinert. Die mehrwelligen Axialspalt-Rotorscheren benötigen keinen Amboß, da die Zerkleinerung über die Spaltmaße zwischen den gegenläufigen Rotorscherenwellen erfolgt. Je nach Ausführung der Zerkleinerungswerkzeuge findet eine weitere Unterscheidung zwischen Rotorschneider (Schneidmühle) und Rotorreißer (z. B. Schredder, Nockenreißer) statt (Woldt 2004).

EWZ oder MWZ können als Vorzerkleinerungsstufe von Rotorblattabfällen verwendet werden. So wird ein EWZ (Schredder) für die Zerkleinerung bei der Neocomp GmbH für die Zementroute verwendet (Doppstadt Umwelttechnik GmbH 2020). Eine Zerkleinerung mittels mobilen EWZ/MWZ am Demontageort wäre ebenfalls möglich, bedingt aber eine Kontrolle der erzeugten Staubemissionen. Je nach Länge der Zerkleinerungswellen und Dimension des Aufgabetrichters

können breite Rotorblattstücke von bis zu 1 m Kantenlänge eingeführt werden. In einem Anwendungsbeispiel wird die Vorzerkleinerung eines kleineren Rotorblatts (ca. 12 m Länge) mittels Zweiwellenzerkleinerer in Kombination mit einem Grabgreifer, der an einem Bagger befestigt ist, dargestellt (Matthies 2019). Um ein Blockieren während der Zerkleinerung zu verhindern, sind sehr starke Motorleistungen des Wellenantriebs notwendig. Für schwerzugreifendes Material existieren Schieber, Schwenkarme oder vereinzelt Einzugswalzen und -bänder (Woldt 2004). Eine gezielte Anpassung des Haufwerks für FVW-Abfälle, insbesondere für Hohlkörperbauteile (z. B. zugeschnittene Rotorblattabschnitte mit glatten Außenoberflächen) kann vorteilhaft sein. Aus Versuchen nach Ebert et al. (2015) resultiert der Vorschlag, für die Zerkleinerung von FVW Axialspalt-Rotorscheren einen möglichst geringen Spalt zu verwenden. Optimierungsbedarf an der Apparateauswahl zeigt auch der MAI Carbon Abschlussbericht: Hier blieben im Rahmen eines Versuches 20 % des Inputmaterials unzerkleinert und fielen zwischen einer zweiwelligen Rotorschere hindurch (Berkmüller et al. 2015). Jedoch ist der Vergleich zu dickeren Rotorblattquerschnitten nur eingeschränkt möglich, da im genannten MAI Carbon Projekt dünne und flächige CFK-Materialien zerkleinert wurden und ein weiterer Versuch mit einer dreiwelligen Rotorschere geringere Verluste ergab (Berkmüller et al. 2015).

Um eine Verwechslung auszuschließen, wird im Folgenden bei EWZ bzw. MWZ von Walzenbrechern bzw. Rotorreißern ausgegangen.

5.2.2.3 Prallbrecher und Hammerbrecher

Bei Prallbrechern werden neben der Beanspruchung durch die am Rotor befindlichen Prallleisten das Material zusätzlich auf Prallplatten beschleunigt und durch den Aufprall zerkleinert. Bei Hammerbrechern sind entweder pendelnd gelagerte oder feste Hämmer am Rotor verbaut, die im Mahlraum das Aufgabegut meist an einem Amboß und anschließend über Austragsroste zerkleinernd ausschleusen. Die Ausführungsform kann je nach Konstruktionsweise variieren. Hammerbrecher gibt es in horizontaler und vertikaler Bauweise. Prallbrecher werden in der Asphalt- und Schlackenaufbereitung eingesetzt (Martens und Goldmann 2016). Hammerbrecher finden Einsatz in der Aufbereitung von Altfahrzeugen, Elektronikaltgeräten und Aluminium-Schrotte (Martens und Goldmann 2016).

Die Prallzerkleinerung ist nach (Michaeli et al. 1993) die geeignetste Methode für Duroplaste, die insbesonders in Rotorblattabfällen vorkommen. Die Umfangsgeschwindigkeiten der Prall- und Hammerbrecher liegen bei 40 bis 90 m/s (Michaeli et al. 1993). Die maximale Aufgabegröße variiert zwischen 50 und 1.000 mm (Zogg 1993). Am Markt sind aber auch große Hammerbrecher verfügbar mit maximalen Aufgabegrößen von bis zu 2.500 mm. Als erste Zerkleinerungsstufe können Prallbrecher und Hammerbrecher daher bei Rotorblättern prinzipiell Anwendung finden. Ein Hammerbrecher kam zum Beispiel in einem von der EU geförderten Projekt zur Zerkleinerung von Rotorblattmaterial zum Einsatz mit einem errechneten Durchsatz von ca. 5.333 kg/h und Outputgrößen zwischen 7 bis 30 mm (Christeen 2012a).

5.2.2.4 Querstromzerspaner

Rotierende Schläger bzw. Ketten die das Aufgabematerial im Mahlraum schlagend zerkleinern sind radial an einem im Mahlraum am Boden angebrachten vertikalen Wellenende befestigt. Eine diskontinuierliche oder kontinuierliche Fahrweise ist möglich. An der Außenwand angebrachte Austragsklappen können entweder geschlossen oder geöffnet sein, bzw. je nach Ausführung mit Austragssieben verbaut.

Der Vorteil des Querstromzerspaners (QSZ) liegt in der von dem Aufgabegut gegenseitig beeinflussenden Prallbeanspruchung im Rotorraum (Tesar und Öhlinger 2009). Ketten oder Schlagkörper als Zerkleinerungswerkzeuge führen zu einer Beschleunigung des Aufgabeguts, wobei die kinetische Energie der zusammenstoßenden Partikel für die Zerkleinerung ausgenutzt wird. Aufgrund der gegenseitigen Prallbeanspruchung ergibt sich eine Verringerung des Gesamtverschleißes (Michaeli et al. 1993). Die maximalen Aufgabegrößen, ausgehend von den am Markt verfügbaren Mahlraumdurchmessern, liegen bei 900 bis 2540 mm. Aktuell wird der QSZ zur Zerkleinerung von GFK-Materialien aus Rotorblattabfällen und weiteren Abfallprodukten wie GFK-Rohren aus anderen Branchen unter Zusatz von feuchten Spuckstoffen verwendet (Lange 2021). Weitere Einsatzbereiche sind der Aufschluss von Elektronik-Schrott, Kühlgeräte, Aluminium- und Metallverbunde sowie in der Biomüllaufbereitung.

5.2.2.5 Prallmühle und Hammermühle

Prall- und Hammermühlen sind in ihrer Konstruktion ähnlich den größeren Prall- und Hammerbrechern. Der Einsatzbereich liegt jedoch in der Mittelzerkleinerung, bzw. im Grobmahlbereich mit Aufgabegrößen von 1 bis 50 mm (Zogg 1993; Stieß 2001). Ein Einsatz für Rotorblattabfall wäre als zweite oder dritte Zerkleinerungsstufe denkbar. Eingesetzt werden diese Apparate für Behälterglas und Bauschutt.

5.2.2.6 Schneidmühle

Bei der Schneidmühle wird das Aufgabegut im Mahlraum an rotierenden Messern und festen Statormessern durch den Schneidspalt zerkleinert und durch das Austragssieb gefördert.

Schneidmühlen bieten sich für die Zerkleinerung von eher weichen Materialien an, wobei duroplastische FVW der mittelharten bis harten Zerkleinerung zuzuordnen sind (vgl. Tabelle 49). Das abrasive GFK-Material der Rotorblätter führt bei der Schneidmühle zu einem erhöhten Verschleiß an den Schneiden und Kanten der Rotor- und Statormesser. Dadurch kann aus der ursprünglichen Schneidbeanspruchung mit zunehmender Abnutzung eine Reiß- und Schlagbeanspruchung werden. Der vergrößerte Spalt zwischen Rotor- und Statormesser führt zu einem Anstieg des spezifischen Energieverbrauchs (Michaeli et al. 1993). Die Aufgabegröße von Schneidmühlen beträgt etwa 50 bis 500 mm (Zogg 1993). Ein mögliches Einsatzgebiet der Schneidmühle wäre der Zerkleinerungsprozess vor der Pyrolyse (Berkmüller et al. 2015). Enthaltene Stahlteile (> 8 mm) sollten jedoch vor der Aufgabe separiert werden, da diese häufig zu Beschädigungen des Zerkleinerungsapperats führen (Michaeli et al. 1993). Der notwendige Energieeintrag ist von dem auftreffenden Keilwinkel der Rotormesser zum Statormesser und dem Schneidkantenradius abhängig (Wüstenberg und Kasper 2004).

5.2.2.7 Kugelmühle

Mahlkörper mit unterschiedlichen Formen und Materialien zerkleinern das Mahlgut zum Beispiel in rotierenden Trommeln, wobei eine Nass- oder Trockenzerkleinerung vorliegen kann.

Kugelmühlen sind für die Fein- und Feinstzerkleinerung geeignet. In vorzerkleinerter Form (Größe < 3 mm) kann damit ein pulverförmiges Produkt hergestellt werden. So konnten Krampitz et al. (2020) CFK-Material mittels einer Kugelmühle und eines dreistufigen Prozesses auf eine Endgröße von 0,1 mm Korngröße zerkleinern, was einen Einsatz in metallurgischen Prozessen ermöglichen würde.

5.2.3 Durchsatz und Leistung der Zerkleinerungsapparate für FVW

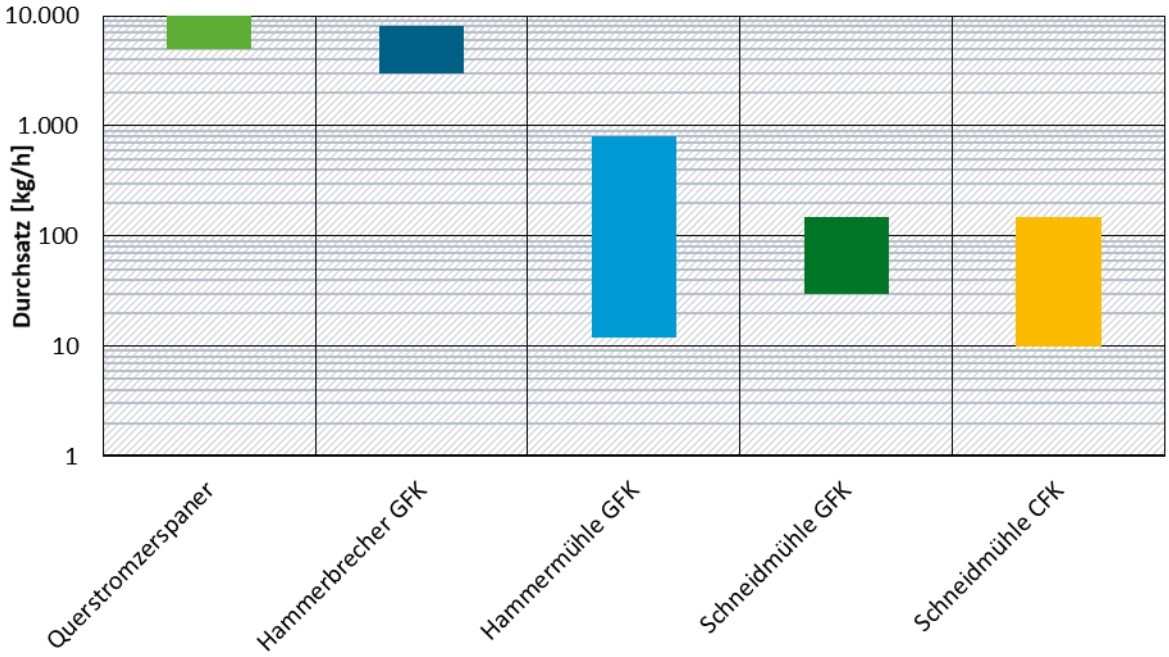
Der Durchsatz ist abhängig von der Anlagengröße des Zerkleinerungsapparats und den spezifischen Dichten der Materialien. Die Drehzahl eines Zerkleinerungsapparats und die

Sieblochgröße, welche die Verweilzeit des Mahlguts im Mahlraum vorgeben, bestimmen ebenfalls den Durchsatz und damit den spezifischen Energiebedarf (siehe Tabelle 53). Zur Eingrenzung der Partikelgrößenverteilung können unterschiedliche Austragssiebe mit variablen Sieblochformen eingesetzt werden. Die Siebe können weggelassen werden, wenn die Spaltmaße oder Austragöffnungen ausreichen, um die Zielproduktgröße zu erreichen. Folgende Einteilung dienen zur Beurteilung der Durchsätze:

- Labormaßstab: 1bis10 kg/h
- Technikumsmaßstab: 10 bis 150 kg/h
- Industriemaßstab: Größer 150 kg/h.

In Abbildung 126 erfolgt ein Vergleich der in der Literatur gefundenen Durchsätze unterschiedlicher Zerkleinerungsapparte bei der Zerkleinerung von FVW mit logarithmischer Achsenskalierung für die Durchsatzangabe.

Abbildung 126: Durchsätze unterschiedlicher Zerkleinerungsapparate bei einer FVW-Zerkleinerung.

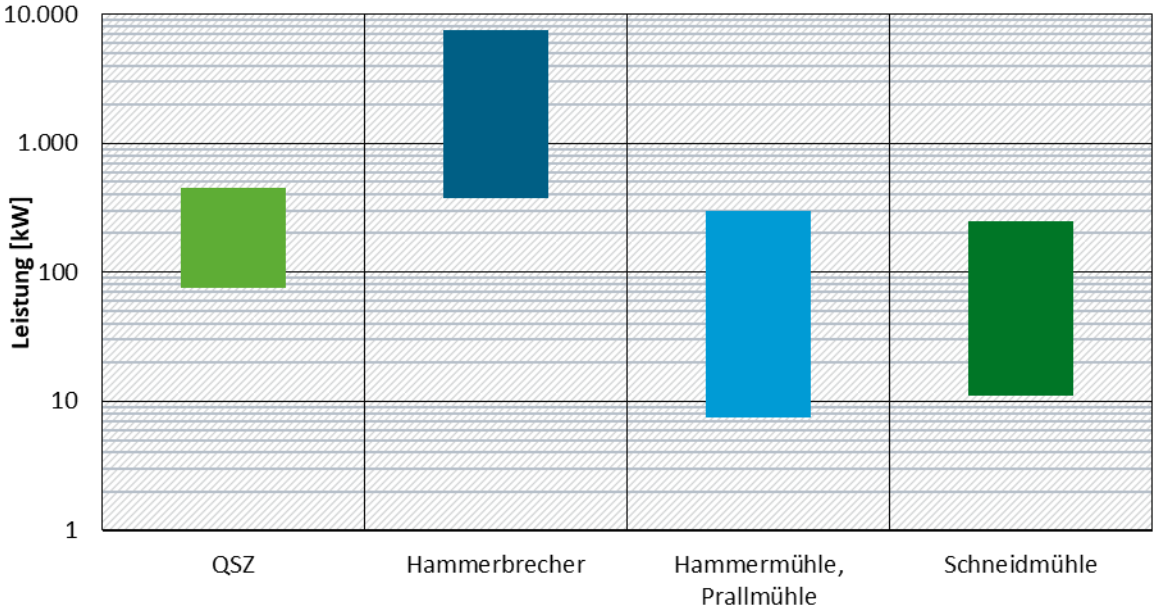


Quelle: Eigene Darstellung, Fraunhofer-ICT, nach Shuaib und Mativenga (2016b), Howarth et al. (2014) und Christeen (2012b).

Aus Abbildung 126 ist zu entnehmen, dass Schneidmühlen mit Durchsätzen von 10 bis 150 kg/h hauptsächlich im Technikumsmaßstab arbeiten. Hammermühlen weisen mit bis zu 800 kg/h höhere Durchsätze auf und liegen im Technikums- und industriellen Maßstabsbereich (Shuaib und Mativenga 2016a).

Eine weitere Unterteilung kann anhand der Leistung einzelner Zerkleinerungsapparate erfolgen, die in Abbildung 127 mit einer logarithmischen Skalierung für die Leistung aufgetragen ist.

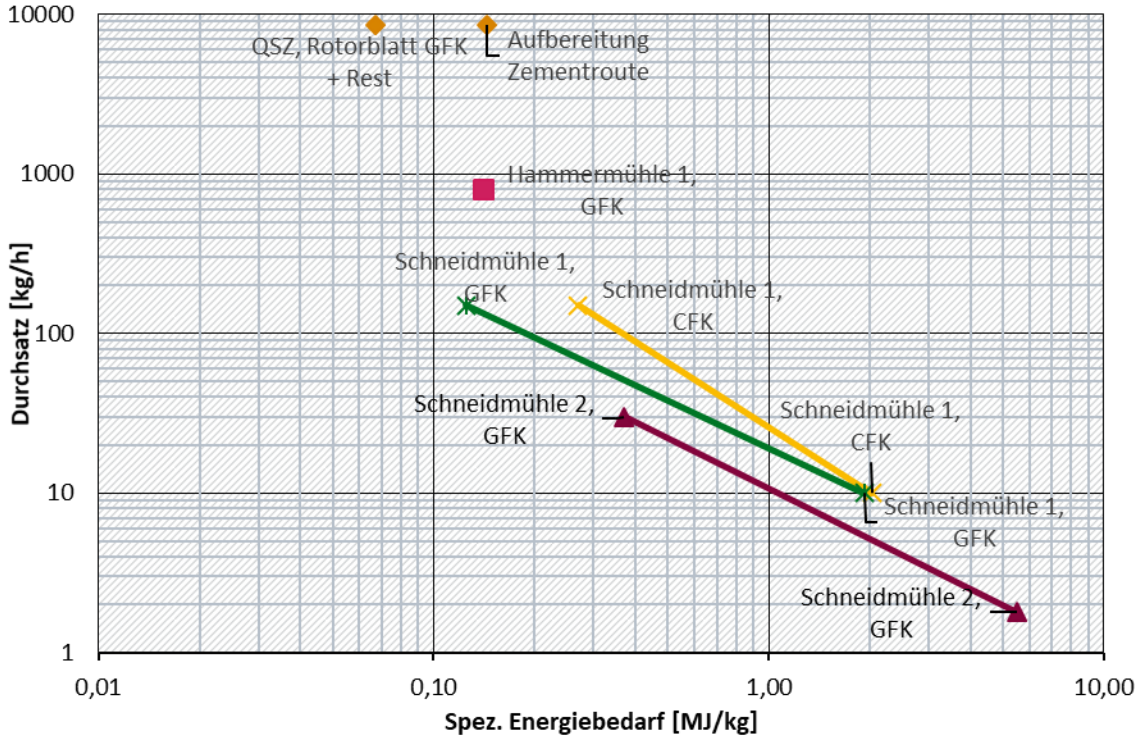
Abbildung 127: Leistung von Zerkleinerungsapparaten.



Quelle: Eigene Darstellung, Fraunhofer-ICT, nach Herstellerangaben.

Abbildung 127 verdeutlicht, dass (kleinere) Hammermühlen und Schneidmühlen im Vergleich zu großen Hammerbrechern (Auto-Schredder) eine geringere Leistung besitzen. Die größte Anlage eines Hammerbrechers hat eine Leistungsaufnahme von 7500 kW. QSZ sind mit Leistungen von 75 kW bis 450 kW erhältlich und im mittleren bis großen Leistungsbereich angesiedelt.

Abbildung 128: Durchsatz und spezifischer Energiebedarf bei einer FVW-Zerkleinerung.



Quelle: Eigene Darstellung, Fraunhofer-ICT, nach Shuaib und Mativenga (2016b), Howarth et al. (2014) und Christeen (2012b).

In Abbildung 128 ist der Durchsatz und der spezifische Energiebedarf der Zerkleinerungsapparate doppelt logarithmisch aufgetragen. Ein linearer Verlauf in einer doppelt logarithmischen Darstellung entspricht einer Exponentialfunktion, die nach Shuaib (2016) material- und apparatespezifisch sind.

Ausgehend von Kapitel 5.2.1wird der Energiebedarf nach Leerlaufleistung eines Apparats und der notwendigen Zerkleinerungsarbeit errechnet. Je größer die installierte Leistung, also der verbaute Motor ist, desto größer ist in der Regel auch die Leerlaufleistung. Der Aufwand für die Zerkleinerungsarbeit ist abhängig von dem zu zerkleinernden Gut. So benötigt die Zerkleinerung mit der „Schneidmühle 1“ für CFK einen höheren spezifischen Energiebedarf als die gleiche Schneidmühle für GFK. Die „Schneidmühle 2“ mit einem maximalen Durchsatz von 30 kg/h zeigt geringere spezifische Energiebedarfe im Vergleich zur „Schneidmühle 1“, welche aber aus der viel kleineren installierten Leistung resultiert (von 5,5 kW auf 2,2 kW). Dadurch ist eine Erzielung des kleinsten spezifischen Energiebedarfs immer abhängig von dem maximal möglichen Durchsatz eines Apparates (Shuaib 2016).

Weiterhin ist in Abbildung 128 zu erkennen, dass Hammermühlen, im Hinblick auf die Zerkleinerung von GFK, einen geringeren spezifischen Energiebedarf als die Schneidmühlen haben. Die Aufbereitung über die Zementroute hat einen spezifischen Energiebedarf von 0,14 MJ/kg, der rückwirkend auf Grundlage einer jährlichen Kapazitätsauslastung von 30000 t und einem Durchsatz von ca. 8500 kg/h errechnet wurde (EuCIA 2013). Über das Apparateblatt eines QSZ-Herstellers wurde hierfür der Leistungswert eines 160 kW-Apparats genutzt, um einen spezifischen Energiebedarf von 0,067 MJ/kg zu berechnen. Da der tatsächliche Energiebedarf jedoch meist unterhalb der Anlagenleistung liegt, ist dieser Wert als konservativ einzuschätzen. Die Lücke zwischen den 0,14 MJ/kg und 0,067 MJ/kg bei konstanten Durchsätzen zeigt, dass weitere Verbraucher, wie beispielsweise Vorzerkleinerer oder zusätzliche Separier- und Klassierapparate, in dieser Rechnung wohl berücksichtigt wurden. Somit liegt der neu errechnete Wert für den QSZ außerhalb des von Amaechi et al. (2020) angenommen Wertebereichs, was bedeutet, dass für industrielle Zerkleinerungsverfahren (abhängig vom Durchsatz) geringere spezifische Energiebedarfe angenommen werden können.

Zu bemerken ist, dass nach Abbildung 128 Datenlücken, insbesondere für EWZ, MWZ, Hammerbrecher für Durchsätze im Industriemaßstab vorliegen.

5.2.4 Klassier- und Sortierverfahren für Rotorblattmaterialien

Klassierverfahren trennen das Mischgut auf Grundlage der jeweiligen Partikelgröße, und Sortierverfahren trennen das Mischgut auf Grundlage anderer stofflicher Eigenschaften der vorhandenen Stoffe, wie z. B. der Dichte, Form, Farbe, Magnetisierbarkeit oder der Leitfähigkeit.

Die Problematik der Klassierung von zerkleinerten FVW liegt in der inhomogenen und stabförmigen Partikelform nach der Zerkleinerung. Dadurch fallen auch größere Partikelklassen mit längeren Fasern durch die Sieblochblenden. Das Durchfallen führt zu einer inhomogenen Partikelgrößenverteilung und folglich zu einer Verschiebung und Verfälschung der eigentlichen Partikelklassen bei der Siebung bzw. im Zerkleinerungsaustrag. Infolge der Abweichung von einer optimalen runden Kugelform gestaltet sich eine weitere Klassierung bzw. Sortierung von unterschiedlich großen Fasern häufig als schwierig. Nichtsdestotrotz können unterschiedliche Klassier- und Sortierverfahren angewendet werden. Tabelle 51 gibt einen Überblick über die gängigen Klassier- und Sortierverfahren für Rotorblattmaterialien.

Tabelle 51: Klassier- und Sortierverfahren von Rotorblattmaterialien.

Technologie	Beschreibung
Siebmaschine	Durch stationäre oder rotierende Siebe kann das Aufgabegut in mindestens zwei Kornklassen getrennt werden. Die Trennschärfe ist abhängig von der Sieblochform und der Sieblochgröße.
Stromklassierer/ -sortierer (Windsichter, Zyklone)	Es findet eine Trennung infolge unterschiedlicher Dichten des Aufgabeguts statt. Die Trennschärfe ist abhängig von der Sinkgeschwindigkeit und Form des Aufgabeguts. Häufig wird durch Stromklassierer der Feingutanteil von dem Mischgut abgetrennt. Eine besondere Form von Schwerkraftsichter bildet der Zick-Zack-Sichter, der eine Mischung aus Quer- und Gegenstrom verwendet. Unterschiedliche Fluide sind einsetzbar.
Herdsortierung, Setzprozess (Trenntisch)	Eine exzentrische Welle bringt ein oder mehrere Siebtische in eine schwingende Bewegung und trennt dadurch das Mischgut infolge unterschiedlicher Dichten, Kornformen und Korngrößen ab. Ein aufwärtsgerichteter Luft- oder Wasserstrom dient dabei zur Auflockerung des Aufgabeguts.
Schwimm-Sink Sortierung	Abhängig von der Dichte des Trennmediums und dem Aufgabegut wird das Mischgut in Schwimmgut und Sinkgut sortiert. Als Anwendung bieten sich Schwerkraftscheider- oder Trommelscheider an. Zur Verbesserung der Trenneffekte kann im Zentrifugalfeld mit Zyklonen, bzw. Zentrifugen gearbeitet werden.
Metallabscheider	Metallabscheider werden in Abfallstoffströmen zur Abreicherung von magnetischen Metallen genutzt. Es existieren Überbandmagnet-, Trommelmagnet- und Bandrollenmagnetabscheider.
Wirbelstrom-abscheider	Wirbelstromabscheider induzieren in elektrisch leitfähigen, nicht-eisenhaltigen Materialien eine Spannung (Kupfer und Aluminium). Bei Nichteisenmetallen kommt es zu einer Abstoßung, womit über eine Wurfbewegung diese separiert werden können. In der Regel werden Metallabscheider den Wirbelstromabscheidern vorgeschaltet.
Elektrosortierung	Bei der Elektrosortierung werden die zu trennenden Stoffe elektrisch unterschiedlich stark aufgeladen und dadurch separiert. Unterschieden wird zwischen elektrostatischen Abscheidern und Koronawalzenscheidern (KWS). Die Trennschärfe ist abhängig von der Leitfähigkeit, der Dielektrizitätskonstanten und der Oberflächenbeschaffenheit der zu trennenden Stoffe. Bei einem KWS wird das Material je nach Leitfähigkeit und Anhaftung auf einer rotierenden Walze ballistisch in unterschiedliche Bereiche geworfen und dabei separiert.

Technologie	Beschreibung
Sensorgestützte Sortierung	Bei der sensorgestützten Sortierung kann die Detektion auf unterschiedliche Art erfolgen. Nach der Detektion kann man z. B. durch Druckluftimpulse die zu sortierenden Stoffe von dem restlichen Abfallstrom abtrennen. Als Verfahren kommen folgende Detektionsarten in Frage: • Nahinfrarot Detektion (NIR): Trennung chemisch unterschiedlicher Kunststoffe, Materialverbünde und NE-Metalle. • Optoelektronische Detektion (VIS-Bereich): Trennung durch farbliche Unterscheidung, Form und Größe der Partikel. • Elektromagnetische Detektion: Induktive Sensoren unterscheiden leitende von nichtleitenden Fraktionen. • Röntgentransmissionsmessung: Die Trennschärfe ist die Materialdichte. Je größer die Materialdichte, desto heller die bildliche Darstellung. Vorteilhaft für die Trennung von PVC und bromierten Kunststoffen von anderen Kunststoffen sind Korngrößen ab 3 mm (Adamec 2007).

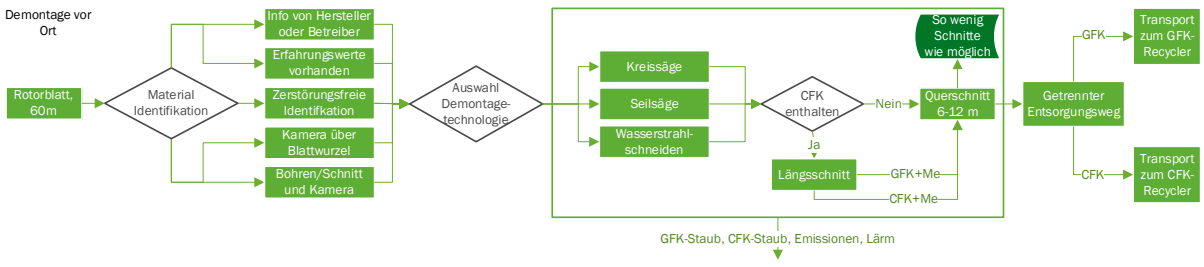
Quelle: Eigene Zusammenstellung, Fraunhofer-ICT, modifiziert nach Martens und Goldmann (2016).

5.3 Zuschnittstufen, Metall-, CFK-, und Sandwichmaterial-Abtrennung der segmentierten Rotorblätter

5.3.1 Zuschnitte in 1m Rotorblatt-Abschnitte

Nachdem die Rotorblätter baustellenseitig von der Nabe der WEA demontiert wurden, findet eine materialspezifische Betrachtung der Bestandteile statt, falls die Informationen nicht bereits vorher eingeholt wurden. Die lokale Identifizierung und Entfernung der Holmgurte (bei Rotorblättern mit CFK-Anteilen) findet in der Regel direkt an der WEA statt. Hierbei sind Herstellerinformationen über die Zusammensetzung und Konstruktion der Rotorblätter zweckdienlich, aufgrund der Vielzahl an unterschiedlichen Rotorblattmodellen und -alter sind diese jedoch meist nicht vorhanden. Falls keine Informationen verfügbar sind, besteht die Möglichkeit über die Öffnung an der Blattwurzel mittels Sichtprüfung oder Kameratechnik erste Erkenntnisse über die verbauten Materialien zu erhalten. Über zusätzliche Bohrungen bzw. Anschnitte mittels Kreissäge oder Trennschleifer können ebenfalls wichtige Erkenntnisse zum Aufbau eines Rotorblatts gewonnen werden, um später präzise Schnitte setzen zu können, die notwendig sind, um die Rotorblattstücke zu den Recyclern zu transportieren. Nach der Materialinspektion an der WEA folgt die Auswahl der Demontagetechnologie. Sollte das Rotorblatt CFK enthalten, sind eventuell mehrere Längsschnitte und Querschnitte notwendig, um eine vollständige Trennung von CFK und GFK zu erreichen. Der Vorgang ist in Abbildung 129 schematisch dargestellt, wobei ein erstes Trennkonzept zwischen CFK und GFK, zum Erreichen einer vollständigen Sortenreinheit beider Verbunde, in Kapitel 5.3.3 beschrieben wird.

Abbildung 129: Fließschema der Rotorblattdemontage und der ersten Zuschnittstufe vor Ort an einer WEA.



Quelle: Eigene Darstellung, Fraunhofer-ICT.

Nach Abbildung 191 (Anhang A.3) wird deutlich, dass unterschiedliche Bauteilgruppen aus Metallen in den Rotorblättern auftreten können. Eine Aussage, wo und in welcher Menge diese Bauteilgruppen zu finden sind, ist aufgrund der Modellvielfalt an Rotorblättern über die letzten Jahrzehnte nicht allgemeingültig zu beantworten. Jedoch können Metalle nach einer Inspektion genau detektiert und entfernt werden, was in Abbildung 130 verdeutlicht ist.

Eine zweite Zuschnittstufe erfolgt mit den Demontagetechniken auf eine Länge von etwa 1 m. Der Fokus im Rahmen der zweiten Stufe sollte sein, die Sägeschnitte zu minimieren und die Rotorblattabschnitte mindestens auf die Größe der maximalen Aufgabegröße der Zerkleinerungsapparate zu bringen. Mögliche zusätzliche Hilfsgeräte, insbesondere für die Metallabtrennung, sind die Hydraulische Scheren bzw. Trennschleifer. Da sich die zu entfernenden Materialien und Komponenten maßgeblich im Blattinneren befinden, ist eine Zerlegung mit den beschriebenen Verfahren aus Kapitel 4 in kürzere Blattabschnitte und Trennung der beiden Halbschalen des Rotorblatts zweckmäßig, falls die Trennung der Halbschalen nicht schon vor Ort an der WEA erfolgt ist.

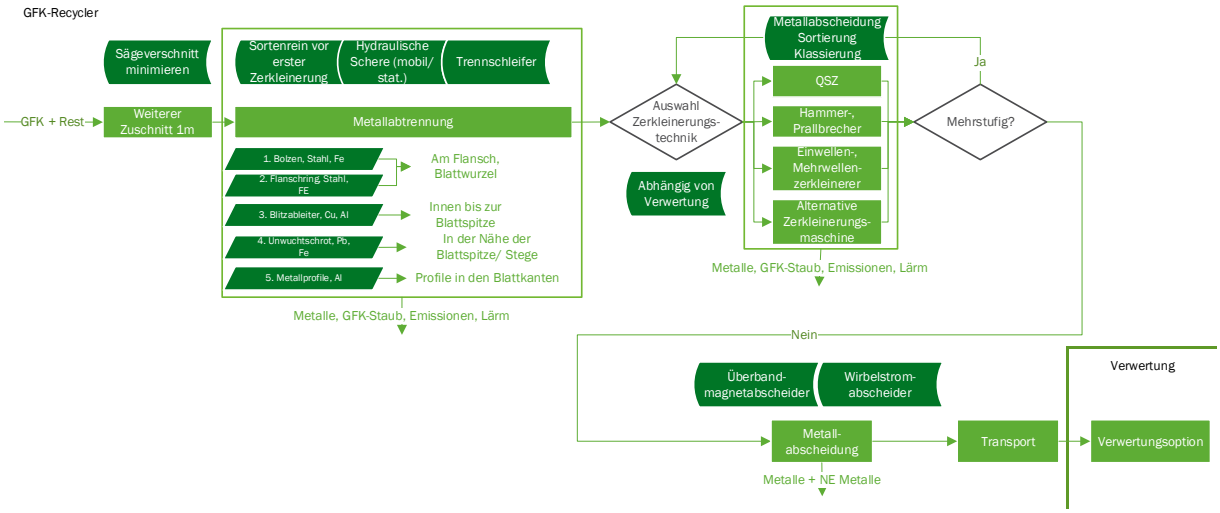
5.3.2 Entfrachtung von Metallen, Elektro- und Elektronikkomponenten

Nach dem Aufbrechen des Rotorblattverbundes können Metalle im Inneren entfernt und anschließend eine erste Zerkleinerung der Rotorblätter durchgeführt werden. Ein Aufbrechen der Rotorblätter ist aufgrund der großen Rotorblattdicke und des hohen Metallanteils (massive Metallbolzen und Metallflanschringe) gerade an der Blattwurzel mit großem Aufwand verbunden. Für die weitere Verwertung sind verbaute Stahl- und Aluminiumschienen sowie Kupferleitungen im Blattinneren für ein weiteres Metallrecycling von Interesse. Weiterhin sind Elektro- und Elektronikkomponenten zu entfernen, die sowohl außen am Rotorblatt oder im Rotorblattinneren verbaut sein können. Moderne Rotorblätter verfügen vermehrt über elektronische Komponenten, die zu entfernen sind; was Sensorik, Blattbeheizung, Blitzschutz und weitere Einrichtungen umfasst. Die Art der Blattbeheizung sollte aus den Konstruktionsunterlagen des Rotorblatts bekannt sein, da es unterschiedlichste Ausführungen gibt, wie zum Beispiel eine Widerstandsheizung mit entsprechender Steuer- bzw. Regeleinheit (vgl. Kapitel 2). Diese weniger massiven Metallteile können manuell abgetrennt oder mithilfe der maschinellen Metallsortierung nach der Zerkleinerung auf Größen von < 200 mm mittels Überbandmagnetabscheidern oder Wirbelstromabscheidern aus dem Materialströmen automatisch aussortiert werden. Die Form und Größe des zu trennenden Materials ist für eine saubere Abscheidung entscheidend sowie z. B. eine Anpassung der Magnetstärke an die Masse der erwartbaren Metallteile. In den Rotorblattspitzen können zum Teil Unwuchtschrote in extra dafür hergestellten Unwuchtkammern verbaut sein. Hierfür wird entweder Metall-, Epoxid- oder auch Bleischrot verwendet (Albers et al. 2021b). Im Falle der Bleischrote ist aufgrund einer Gefährdung von Mensch und Umwelt vor allem im Rahmen der Demontage Vorsicht geboten. Hier muss eine Schadstoffentfrachtung erfolgen, zumal besonders Bleistäube kritisch sein können, sollten diese mit einer Trenntechnik angeschnitten werden. Klare Herstellerinformationen können diese Entfrachtung erheblich erleichtern. Auch bei allen weiteren Metall- oder Epoxidschroten sollte ein vorsichtiger Zuschnitt erfolgen, um die Schrote zu entfernen.

Diese Teilschritte der Abtrennung sollten bei lokalen Entsorgungsfachbetrieben durchgeführt werden und können direkt an den angelieferten Rotorblattelementen erfolgen, zumindest für außen am Rotorblatt angebrachte Komponenten. Die zu entfernenden Materialien können zentral an einem Ort verbaut sein, wie zum Beispiel die Stahlbefestigung an der Rotorblattwurzel oder Unwuchtgewichte in der Nähe der Rotorblattspitzen. Materialien können sich auf der Blattaußenseite befinden (Blitzschutz-Rezeptoren), wobei jedoch der maßgebliche

Anteil im Blattinneren verbaut ist. Somit sind Materialien und Komponenten zur Abtrennung sowohl lokal an einem Ort des Rotorblatts verbaut, als auch verteilt über das gesamte Rotorblatt, was für die Blattbeheizung oder den Blitzschutz zutreffen kann.

Abbildung 130: Abtrennung metallischer Rotorblattbestandteile und die anschließende Auswahl an Zerkleinerungstechnik.



Quelle: Eigene Darstellung, Fraunhofer-ICT.

Nach der Abtrennung von Metallen, CFK-Gurten und sonstiger Einrichtungen (elektrische und elektronische Bauteile, Blattbeheizung und Blitzschutz) können die vorzerkleinerten Rotorblattstücke einem geeigneten Zerkleinerungsapparat zugeführt werden (siehe Tabelle 51). Nach dieser ersten Zerkleinerungsstufe erfolgt eine Metallabscheidung (Magnetabscheider), um Eisenmetalle und auch Nichteisenmetalle (Wirbelstromabscheider) zu entfernen. Je nach Verwertungsweg folgen weitere Klassier- oder Sortierschnitte (siehe Tabelle 47). Erfolgt eine weitere Zerkleinerungsstufe, werden alle übrigen Metallfraktionen mithilfe von Fe-Metallabscheidern (Überbandmagnetabscheider) und nachgeschalteten NE-Metallabscheidern (Wirbelstromabscheider) für Aluminium oder Kupfer entfernt. Damit ist am Ende der Aufbereitung eine komplette Metallentfrachtung des verbleibenden Rotorblattabfalls gesichert. Nachfolgend sind die technischen Anforderungen für die Prozesse und Apparate aufgelistet:

- Demontage großer Metallteile bei einem Entsorgungsfachbetrieb (Hydraulische Schere, Trennschleifer): Ziel ist eine möglichst sortenreine Metallabtrennung vor der ersten Zerkleinerungsstufe. Zu demontieren sind der Metallflansch, die Verbindungsbolzen und die Unwuchtgewichte. Um Schäden im Mahlraum der ersten Zerkleinerungsstufe zu vermeiden, werden die massivsten Metallteile (Bolzen) vorher abgetrennt.

- Erste und weitere Zerkleinerungsstufe (siehe Auswahl Tabelle 50): Zunächst müssen die maximalen Inputmaße bei der Eingabe in die Zerkleinerungsapparate beachtet werden. Mit einer erhöhten Verweilzeit in Prallbrechern neigen Aluminiumteile und Kupferdrähte zur Verkugelung (Schwarz et al. 2015), was zu einer besseren nachgeschalteten NE-Metallabscheidung führen kann.

- Fe-Metallabscheider (Überbandmagnetabscheider): Optimale Verarbeitungsgrößen liegen zwischen ca. 0,5 mm und über 10 cm. Der Abscheidegrad liegt bei ca. 95 bis 98 %. Es wird empfohlen, die gegenüber Verschleiß unempfindlicheren Überbandmagnetabscheider den Trommelabscheidern vorzuziehen.

- NE-Metallabscheider (Wirbelstromabscheider): Optimale Verarbeitungsgrößen liegen je nach Hersteller zwischen ca. 0,3 mm und 200 mm. Der Abscheidegrad ist abhängig von einer homogenen runden Partikelform und liegt bei ca. 80 bis 99 %. Es empfiehlt sich eine vorgeschaltete Fe-Metallabscheidung für eine gleichmäßige Abtrennung der NE-Metalle.

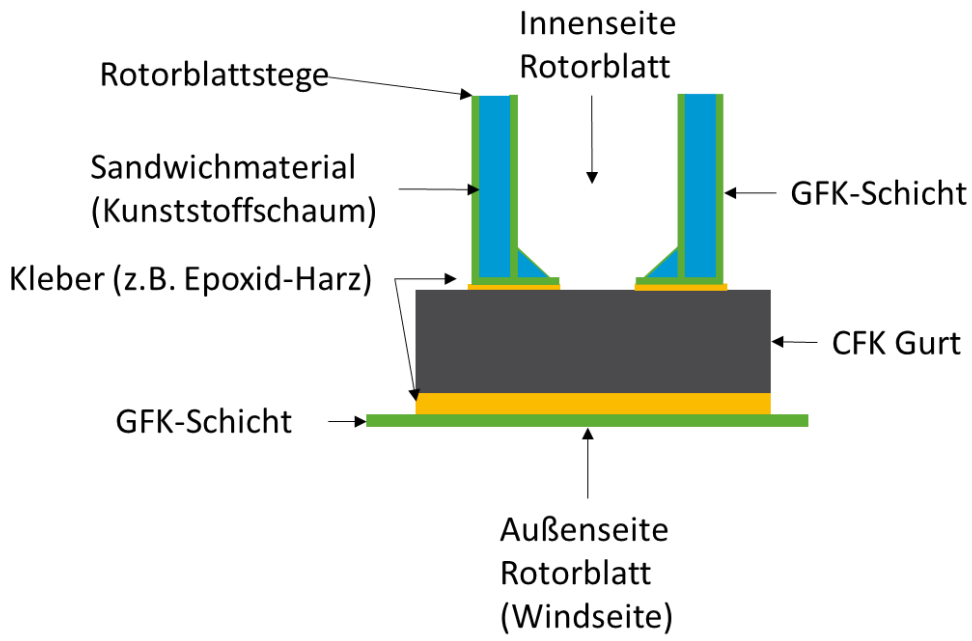
Die technischen Anforderungen an die Metallabscheidung sind maßgeblich abhängig von der Größe der abzuscheidenden Materialien. Aus diesem Grund ist es wichtig, die vorgeschaltete Demontage großer Metallteile sorgfältig und bestmöglich durchzuführen, damit durch die automatische Metallabscheidung gewährleistet ist, dass keine Metallrückstände in den fraktionierten Abfallströmen für die Verwertung vorliegen.

5.3.3 Konzept CFK/GFK Trennung

Die CFK-Abtrennung ist eine Voraussetzung für die GFK-Verwertung im Zementwerk. Ein Co-Processing von CFK bei der Calciumcarbidherstellung bedingt eine sortenreine CFK-Fraktion ohne GFK-Anteile. Bei der ersten Zuschnittstufe sollte der Schnittabstand zum CFK-Gurt gering sein, um den GFK-Störstoffanteil für die CFK-Verwertung zu rCF zu minimieren. Eine weitere Aufbereitung der so herausgetrennten CFK-Gurte könnte notwendig sein, um den GFK-Störstoffanteil zu reduzieren, was vom Recyclingprozess und der Produktqualität der zu gewinnenden rCF abhängt. Nachfolgend wird ein Konzept zur Reduzierung von dem GFK-Störstoffanteil beschrieben (Abbildung 132).

Nach Kapitel 2 befinden sich CFK-Anteile im Gurtbereich vom Anfang der Blattwurzel bis meist kurz vor der Blattspitze. Die in der ersten Zuschnittstufe entfernten CFK-Gurte können über einen GFK-Anteil an der Außenschicht sowie orthogonal verklebte Stege aus Sandwichmaterial (GFK und Schaumstoff) auf der Innenseite verfügen. In Abbildung 131 ist schematisch ein solcher Aufbau mit einem CFK-Gurt im Querschnitt dargestellt (Abbildung 2 und Abbildung 192 im Anhang A.3). Bezüglich neuerer Rotorblattkonstruktionen können hybride Faserverbundstrukturen vorkommen, bestehend aus GF- und CF-Lagen, die nur als gesamtes Element herausgetrennt werden können (Zotz et al. 2019).

Abbildung 131: Schematischer Gurtaufbau im Querschnitt.



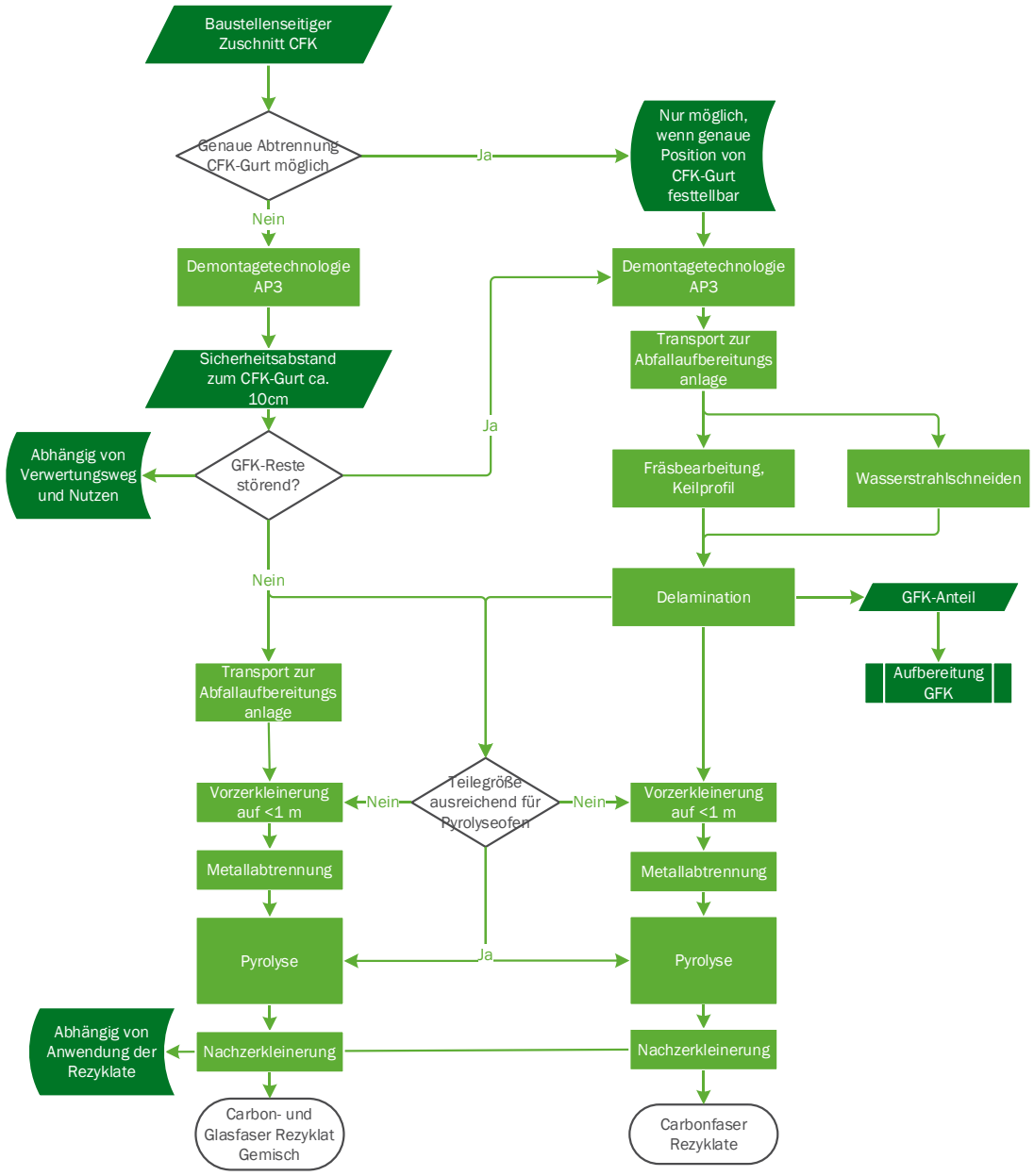
Quelle: Eigene Darstellung, Fraunhofer-ICT, beispielhaft nach Anhang A.3.

Nach der Lokalisierung der CFK-Gurte mithilfe unterschiedlicher Detektoren kann die Auswahl der Demontagetechnik erfolgen. Um die Kontamination von GFK mit CFK auszuschließen ist es sinnvoll, mit einem Sicherheitsabstand von ca. 10 cm zum CFK-Gurt diesen aus dem Rotorblatt zu entfernen.

Sollte bei der Abtrennung der CFK-Gurte, wo immer ein GFK-Anteil erhalten bleibt, die GFK-Menge für das CFK-Recycling zu hoch sein, so liegt nach dem Recycling mittels Pyrolyse ein Carbon- und Glasfasergemisch vor, was den Wert des Rezyklats beeinträchtigen kann. Zur Trennung von GFK-Schichten oder GFK-Bauteilen von den CFK-Teilen wie z. B. Stege, die orthogonal zum CFK-Gurt von der Innenseite angebracht sind, ergeben sich folgende Möglichkeiten:

- Belassung der GFK-Außenschicht (Teile der Gurte und weitere Aufbereitung von CFK-Gurt mit GFK-Anteil). Diese Methode schränkt eine weitere Verwertung des CFK als Rezyklat aufgrund der Vermischung von CFK und GFK ein und ist daher nicht empfehlenswert.
- Eine fräsende Bearbeitung zum Abtrag der GFK-Außenschicht sowie der GFK-Schicht an der Innenseite der Stege. Nachteil dieser Methode ist die große zu fräsende Menge an GFK, die in Emissionen und die Freisetzung von Stäuben resultiert. Hinzu kommt ein weiterer Bedarf an Zerkleinerungsmaterial und Prozessenergie. Eine dickere GFK-Außenschicht führt zu einem größeren Fräsbedarf.
- Eine quer zur Schnittkante spaltende Trenntechnik, wie z. B. mithilfe von Wasserstahlschneiden, wobei die Delamination, d. h. die schichtweise Aufspaltung des Faserverbundes, über den Wasserdruck erfolgt. Diese Möglichkeit ist hinsichtlich des Aufwandes und der zu erwartenden Emissionen bzw. den Verlusten als eine vorteilhafte Variante zu bewerten.
- Durch das Eintreiben eines Keils zwischen CFK- und GFK-Schicht über hydraulische Pressen könnte eine Trennung erfolgen und eine Abhebelung der Deckschicht (Delamination) erfolgen, wobei eine von der erforderlichen Qualität (CFK-Reinheit) abhängige Nachbearbeitung notwendig wäre.

Abbildung 132: Konzept der GFK/CFK Abtrennung.



Quelle: Eigene Darstellung, Fraunhofer-ICT.

5.3.4 Trennung von GFK, Balsaholz und Schaum

Um die Verbundmaterialien GFK, Balsaholz und Schäume mechanisch von dem Matrix- und Faseranteilen vollständig zu trennen, benötigt es in der Zerkleinerungstechnik eine saubere Trennung zwischen den einzelnen Schichten. Dieser vollständige Aufschluss ist wohl nicht zu erreichen, da starke Adhäsionskräfte zwischen Faser und Matrix (bzw. zusätzliche Kleberreste), zwischen Matrix und Schaum sowie zwischen Matrix und Balsaholz bestehen. Nach der Zerkleinerung von Faserverbundkompositen liegen meistens noch Restanhaftungen an den einzelnen Materialien vor. Diese Restanhaftungen sind entweder einzelne Matrixreststücke oder einzelne GFK-Reststücke die weiterhin an Schäumen, Balsaholz oder Kleberresten anhaften. Durch die Zerkleinerung entsteht insgesamt ein heterogenes Materialgemisch.

Zur Trennung von den Bestandteilen Balsaholz und Schäume mit Restanhaftungen bieten sich Sortiertechniken mittels Stromklassierer, Luftsetzherde, oder sensorgestütze Sortieranlagen an

(vgl. Tabelle 51), um diese Stoffströme z. B. nach Dichte, Form oder farblicher Unterscheidung von den GFK-Stücken abzutrennen und nach Bedarf zu verwerten. In dem von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt geförderten Projekt (Kramer et al. 2020) konnte CFK-Abfall aus der Automobilindustrie im Labor- und Pilotmaßstab mittels einem Schwimm-Sinkverfahren Schäume und Kunststoffe mit Dichten kleiner 1 g/cm^3 effizient in Wasser separiert werden. Eine industrielle Möglichkeit besteht in der Nutzung eines Hydrozyklons. Bei der Verwertung sind möglichst sortenreine Materialien wünschenswert und wie beschrieben ist dies aufgrund der unterschiedlichen Restanhaftungen für eine geeignete Verwertung schwierig zu realisieren. Die Massenanteile von Balsaholz (max. 8 %) und Kunststoffschäumen (max. 5 %) variieren abhängig von Rotorblatttypen. Bei Rotorblättern mit hauptsächlich verbautem Balsaholz als Sandwichmaterial ist meist ein kleiner Anteil an Schaum verbaut, bei den restlichen Rotorblättern sind sonst nur Kunststoffschäume verbaut. Aufgrund der Schaumvielfalt können unterschiedliche Materialien je Rotorblatttyp verbaut sein. (vgl. Abschnitt 2.2.3.5 und Albers et al. (2021a)). Für die aus Rotorblattabfällen stammenden Materialströme Balsaholz und Schäume gibt es außer der Zementroute keine weiteren am Markt etablierte Aufbereitungs-, bzw. Verwertungsprozesse.

Ein möglicher Ansatz um den Anteil von Balsaholz oder Schäume innerhalb der Prozessketten zu erhöhen, wäre ein separater Zuschnitt der Balsaholz- und Schaumstoff- Abschnitte am Rotorblatt während der ersten (an der WEA) oder der zweiten Zuschnittstufe (bei dem Entsorgungsfachbetrieb). Dies kann jedoch abschließend nur eine ganzheitliche Betrachtung aufzeigen, denn selbst mit höheren Balsaholz- oder Schaumanteilen nach den Zuschnitten ist die Sortenreinheit nicht gegeben, sondern nur eine gewisse Anreicherung beider Materialien (Balsaholz oder Schaum) mit Restschichten aus GFK in den aufbereiteten Abfallströmen.

5.4 Beschreibung der verwertungsspezifischen Aufbereitung

In diesem Kapitel wird die verwertungsspezifische Aufbereitung von Rotorblattabfällen nach deren Zuschnitt und Entfrachtung dargestellt.

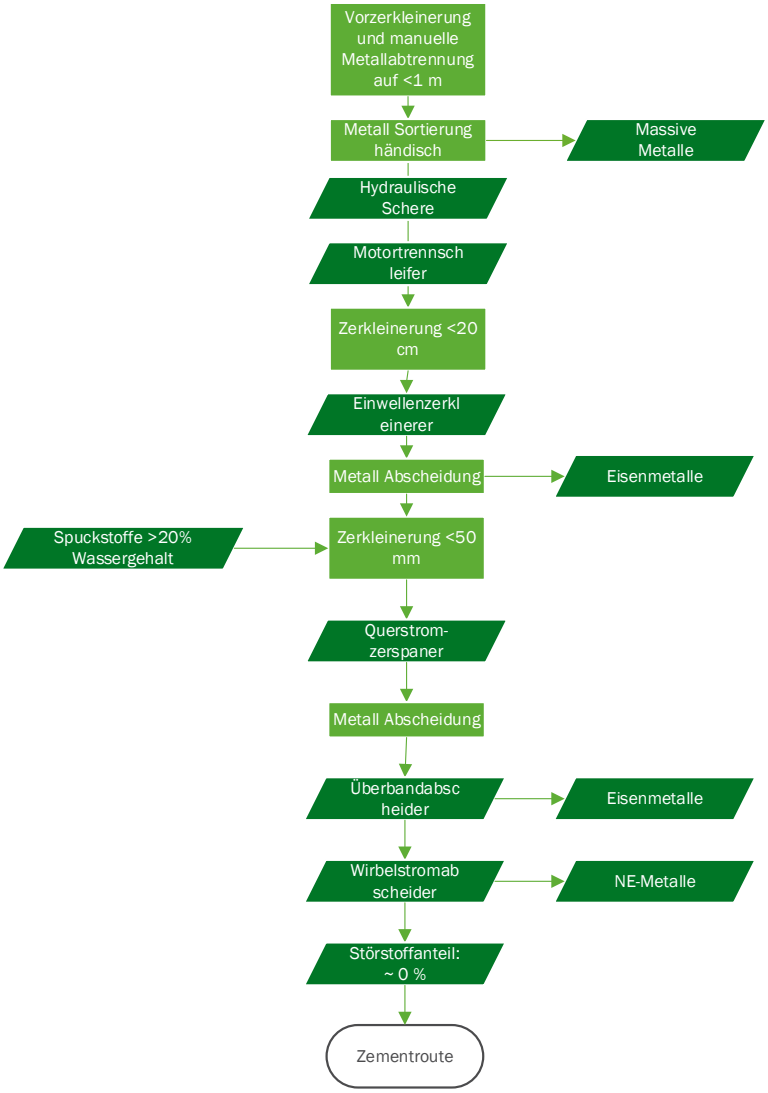
5.4.1 Aufbereitung von Rotorblattabfällen für die Verwertung von GFK-Abfällen in Zementwerken

Für eine Verwertung der GFK-Bestandteile in der sogenannten Zementroute (Abbildung 133) erfolgt eine zweistufige Zerkleinerung des Rotorblattmaterials. Nach der bereits beschriebenen manuellen Metallabscheidung wird das vorzerkleinerte Rotorblattmaterial in einem EWZ auf Ausgabegrößen kleiner 20 cm zerkleinert. Anschließend wird das zerkleinerte GFK-haltige Material zusammen mit feuchten Spuckstoffen aus der Papierherstellung (zur besseren Bindung der Stäube) in einem QSZ auf eine Korngröße kleiner 50 mm (zur optimalen Verwertung im Zementwerk) zerkleinert (Bledzki et al. 2021). Anschließend wird das Rezyklat zum Zementwerk transportiert, wo es einer Materialcharakterisierung unterzogen wird. Bei den ermittelten Störstoffen handelt es sich hauptsächlich um verbliebene Metalle oder CFK-Anteile, weshalb eine Abtrennung der CFK-Gurte mithilfe der Demontagetechnik aus Kapitel 4 unbedingt erforderlich ist. Sandwichmaterialien wie Balsaholz oder Kunststoffschäume sind für die Mitverbrennung im Zementwerk unkritisch und müssen nicht explizit im Rahmen der Aufbereitung abgetrennt werden. Nachfolgend sind die technischen Anforderungen für die Zementroute aufgelistet und beschrieben.

- CFK-Abtrennung (Demontagetechnik, siehe Kapitel 4): Als erste Reinheitsanforderung für die spätere Verwertung des Rotorblattmaterials im Zementwerk ist die vollständige Entfernung des CFK-Anteils erforderlich.

- Erste und zweite Zerkleinerungsstufe (EWZ und QSZ): Abhängig von der maximalen Inputgröße in den Zerkleinerungsapparat müssen große Metallteile vorher abgetrennt werden. Der Vorgang ist auf zwei Zerkleinerungsstufen zur Minimierung des Staubanteils (z. B. durch diffuse Emissionen beim Umladen des Aufgabeguts) zu reduzieren. Optional können bei passenden Aufgabegrößen die Rotorblattabschnitte direkt in den QSZ, in die erste Stufe, gegeben werden.

Abbildung 133: GFK-Aufbereitungsweg für die Verwertung in Zementwerken.



Quelle: Eigene Darstellung, Fraunhofer-ICT.

5.4.2 Aufbereitung für die Pyrolyse

Die Demontage, die erste und zweite Zuschnittstufe, erfolgen analog zur GFK-Zementroute. Jedoch besteht hier die Möglichkeit die Metalle nicht zwingend manuell abzutrennen, da sie im Rahmen der Pyrolyse nicht stören. Nach dem Pyrolyseprozess bleiben die Metalle als Reste im Output-Strom zurück, während die Matrixreste pyrolysiert werden. Bei der Pyrolyse ist die maximale Aufgabegröße des Materials durch die Größe des Pyrolyseofens vorgegeben. Ausgehend von dem Patent von ELG Carbon Ltd. sind maximale Kantenlängen von einem bis zwei Meter und die maximal zulässige Höhe von ca. 25 cm verwertbar (Davidson und Price 2009b). Nach Abkühlung der Pyrolyseprodukte erfolgt die Abtrennung der freigelegten Metalle.

Bei langen Fasern könnte eine maschinentechnische Metallabscheidung sich schwierig gestalten, aufgrund freigelegter Faserverwickelungen um Metallbolzen oder restliche Metallteile. Eine vorher eingesparte Zerkleinerung der Rotorbruchstücke wird sich somit in einer erhöhten Nacharbeitung der Pyrolyseprodukte (Nacharbeitung mittels Schneidmühle oder einer Guillotineschere) bemerkbar machen. Je nach Verwertung der Rezyklatfasern wird eine optimierte Zerkleinerung und Klassierung bis zu den erwünschten Korngrößen erforderlich.

Bei einer Vorzerkleinerung ist, wie bei der Zementroute, eine Metallabtrennung sinnvoll. Ein zusätzlicher Vorteil kann im Falle von zerkleinerten FVW-Stücken im Vergleich zu der Eingabe einzelner Rotorblattabschnitte (CFK-Gurt) eine verringerte Verweilzeit im Pyrolysereaktor als Ergebnis sein, womit ein erhöhter Durchsatz möglich ist. Die bei der Zerkleinerung zu erzielenden Faserlängen sind weitgehend abhängig von der Vorzerkleinerung als Input der Pyrolyse und liegen bei maximal 100 mm, damit eine praktische Nachverarbeitung z. B. über Kardierverfahren zur Vließherstellung möglich ist (Seiler et al. 2016). Denkbare Zerkleinerungsapparate sind Walzenbrecher mit speziell ausgelegten Zerkleinerungsprofilen zur Mitzerkleinerung von feuchten CFK-Prepregs aus Herstellungprozessen.

5.4.3 Mechanische Verwertung von FVW als Ersatzfüllstoff

Bezüglich des mechanischen Recyclings stehen verschiedene Klassier- und Sortiertechniken zur Verfügung. Eine zweistufige Zerkleinerung ist für ein rein mechanisches Recycling meist nicht ausreichend, da die Stufenanzahl abhängig von der Zielpartikelgröße ist, und je nachdem, ob ein Füllstoff (vergleichbar zu Kalk mit einer Partikelgröße von 200 µm) oder eine Verstärkungsfaser als Zielprodukt erzeugt werden soll.

Nach dem in Kapitel 6 näher beschriebenen ERCOM-Verfahren wird für die Füllstoff-, oder Verstärkungsfaser eine Vorzerkleinerung notwendig, wobei diese identisch zu der Zementroute mit einem EWZ oder MWZ als Vorzerkleinerung geschehen kann. Bei ERCOM wurde als Vorzerkleinerung ein auf einem Lastzug aufgebauter EWZ verwendet, wobei dezentral die SMC-Abfälle von den beteiligten Unternehmen aufgesammelt und vorort auf Größen von ca. 50 mm vorzerkleinert wurden. Die Kapazitäten pro Fahrt lagen bei maximal 10 t bzw. 30 m^3 (Weaver 1992).

5.5 Bewertung der Aufbereitungsprozesse für Rotorblattabfälle

Im Folgenden werden die Aufbereitungsprozesse mit den jeweiligen Zerkleinerungsapparaten anhand der in Kapitel 5.1 festgelegten Bewertungskriterien bewertet.

5.5.1 Technology Readiness Level (TRL)

Ein Überblick der TRL-Bewertung hinsichtlich des zu verarbeitenden Materials ist in Tabelle 52 zusammengestellt. Das Hauptkriterium ist die Verarbeitbarkeit der in den Rotorblättern vorkommenden Materialien. Auf eine Unterscheidung hinsichtlich der Zerkleinerungsapparate wurde verzichtet, da insbesondere die mechanische Aufbereitungstechnik in der Regel ausgereift ist, und lediglich Unterschiede bezüglich der Durchsätze bestehen. Die folgende TRL-Bewertung wurde der Literatur entnommen und durch persönliche Einschätzungen ergänzt.

Tabelle 52: Zuordnung der Technologiereife anhand der Rotorblattmaterialien und den ausgewählten Prozessen.

Material	TRL	Prozess
GFK, Kunststoffschaum, Balsaholz	9	Zerkleinerung
Stahl, NE-Metalle	9	Maschinelle Metallseparierung und Metallentfrachtung
CFK	8	Zerkleinerung
Balsaholz	4	Sortierung
Kunststoffschäume	4 - 5	Sortierung

Quelle: Eigene Zusammenstellung, Fraunhofer-ICT, modifiziert nach Rybicka et al. (2016).

Es gibt mehrere mechanische Zerkleinerungsapparate, die für die Zerkleinerung von GFK im industriellen Maßstab geeignet sind, weshalb der TRL für die GFK Zerkleinerung mit 9 angesetzt wird.

Apparate für die Separation von NE- und Fe-Metallen aus einem Schüttgut gehören zum Stand der Recyclingtechnik, sind zuverlässig und technisch ausgereift. Die generellen technologischen Grenzen existieren im Hinblick auf die Korngrößenverteilung. Ein Beispiel der Funktionsfähigkeit der Metallentfrachtung aus Rotorblattabfällen zeigt die Zementroute.

Für CFK liegt der TRL für die Aufbereitung bei 6 bis 7 (Rybicka et al. 2016). Diese Einstufung hat mehrere Gründe: Zum einen sind die Abfallmengen für CFK im Vergleich zu GFK niedrig und somit die vorhandenen Kapazitäten gering. Zum anderen bestehen im Rahmen der Aufbereitung von CFK-haltigem Material aufgrund der Leitfähigkeit von CF-Stäuben erhöhte Sicherheitsanforderungen an die Apparatetechnik, wie z. B. eine gekapselte Einhausung sowie ein notwendiger Schutz der elektrischen Anlagentechnik und explosionsgeschützte Motoren und Anlagenteile. Durch die Marktaktivitäten im Bereich der CFK-Pyrolyse und der damit einhergehenden Notwendigkeit einer Zerkleinerungstechnik für CFK-Abfälle wird ein TRL von 8 angesetzt, was nicht der Bewertung nach Rybicka et al. (2016) entspricht.

Die Verwertungsmöglichkeiten von Balsaholz wurden im Rahmen des Projekts ReRoBalsa untersucht (Fraunhofer-Institut für Holzforschung, Wilhelm-Klauditz-Institut (WKI) 2020). Ein potentieller Einsatz in Holzdämmplatten aus Fasermaterial sowie in Holzschäumen als Dämmmaterial sollte nach entsprechender Markteinführung möglich sein. Eine nähere Beschreibung ist in Kapitel 6 zu finden. Balsaholz aus Rotorblättern ist nach der AltholzV (mit verarbeitetem Holzschutzmittel) der Klasse IV zuzuordnen. Die sortenreine Abtrennung von Balsaholz vom restlichen Verbundmaterialien der Rotorblattabfälle ist entscheidend für eine weitere Verwertung dieses Materials. Nach derzeitigem Stand der Sortiertechnik für Balsaholz aus Rotorblattabfällen ist ein TRL von etwa 4 anzunehmen.

Für die Kunststoffschäume aus Rotorblattabfällen existieren bisher nur wenige Aufbereitungskonzepte, was mit der Vielfalt an verbauten Schäumen in den Rotorblättern begründet werden kann. Eine unterstützende sensorbasierte Sortierung (siehe Tabelle 51) kann dabei hilfreich sein, Schaumreste aus Materialströmen zu entfernen. Unabhängig vom Rotorblatttyp könnten durch den Einsatz unterschiedlicher sensorbasierter Sortiersysteme auch Kunststoffschäume sortiert werden. So besteht die Möglichkeit PVC-Schäume mittels Röntgentransmissionsmessung zu sortieren. Alle übrigen PMI-, PET- oder PUR-Schäume könnten mittels NIR-Detektion erkannt und aus den aufbereiteten gemischten Materialströmen mittels Luftstoßtechnik separiert werden. Nach Kramer et al. (2020) konnte CFK Material mit

Kunststoffschäumen als Störstoff mittels Schwimm-Sink Scheider von dem CFK sortiert werden. Da die Materialien ähnliche Dichten aufweisen wie aufbereitete Rotorblattabfälle, liegt nach eigener Einschätzung der TRL bei etwa 4 bis 5.

5.5.2 Energiebedarf

Für eine exakte Beurteilung des Energiebedarfs sind Messungen an Zerkleinerungsapparaten mit den zu zerkleinernden Materialien notwendig. Dabei wird die Leerlaufleistung mit der dafür benötigten Zerkleinerungsenergie verrechnet. Da die Literaturrecherche bezüglich der Energiebedarfe keine klaren Ergebnisse ergab, wird im Folgenden der spezifische Energiebedarf betrachtet. Die in der Literatur angegebenen Werte gelten für FVW und sind deshalb auf Rotorblattabfälle übertragbar. Die Angaben sind anlagenspezifisch zu betrachten und insbesondere für dicke, schwer zu zerkleinernde und abrasiv wirkende Rotorblätter nicht direkt übertragbar. Wenn keine weiteren Angaben zu FVW angegeben sind, sollten für Vergleichszwecke eher konservative Werte angenommen werden. Tabelle 53 gibt eine Übersicht zum spezifischen Energiebedarf für die Zerkleinerung von FVW.

Tabelle 53: Spezifischer Energiebedarf und Durchsatz der FVW-Zerkleinerung.

Zerkleinerung	Energiebedarf [MJ/kg]	Durchsatz [kg/h]	Material	Quelle
Allgemeine mechanische Aufbereitung	0,1-4,8	-	GFK	(Amaechi et al. 2020)
Hammermühle	0,14	800	GFK	(Shuaib und Mativenga 2016a)
Hammermühle	0,26; 0,31	-	CFK; GFK-Sandwich	(Hedlund-Åström 2005)
Schneidmühle	0,13; 0,37; 5,53	150; 30; 1,8	GFK	(Shuaib 2016)
Schneidmühle (Granulator)	0,27-2,03	10 - 150	CFK	(Howarth et al. 2014)
Hammermühle	1,29 - 1,41	12	Rotorblatt GFK-Balsaholz	Berchnet aus (Fraunhofer-Institut für Holzforschung, Wilhelm-Klauditz-Institut (WKI) 2020)
Hammerbrecher (Auto-Schredder)	-	Ca. 5333	Rotorblatt GKF mit Balsaholz	(Christeen 2012a)
Aufbereitung Zementroute (QSZ)	0,14	Ca. 8500	GFK + Rest und Spuckstoffe	(EuCIA 2013)

Quelle: Eigene Zusammenstellung, Fraunhofer-ICT.

Tabelle 53 zeigt, dass sich der Energiebedarf im Labor- und Technikumsmaßstab sowie im Rahmen der industriellen Aufbereitung von FVW in dem von Amaechi et al. (2020) angenommenen Wertebereich zwischen 0,1 und 4,8 MJ/kg bewegt. Die Daten vom Fraunhofer WKI wurden mit einem 70 %igen Energiebedarf von der Nennleistung von 5,5 kW der Hammermühle und den zusätzlichen angegebenen Zerkleinerungsenergien berrechnet. Die Untersuchungen des Fraunhofer-Institut für Holzforschung, Wilhelm-Klauditz-Institut (WKI)

(2020) zeigen darüber hinaus eine Abhängigkeit der spezifischen Zerkleinerungsenergie (ohne Leerlaufleistung des Apparats) der jeweiligen Zerkleinerungstechnik von der eingesetzten Sieblochgröße: Die Zerkleinerung eines Ausgangsmaterials mit einer Korngröße von etwa 38 mm bei einer Siebmaschenweite von 4 mm war dabei effizienter, als die Zerkleinerung bei einer größeren Siebmaschenweite von 10 mm. Als Vergleich dient bei der kleineren Siebmaschenweite von 4 mm der größere Zerkleinerungsgrad von 37 im Vergleich zu 11 bei 10 mm Maschenweite.

5.5.3 Verschleiß

Der Verschleiß ist abhängig von dem tribologischen System der zu betrachtenden Wechselwirkungen zwischen Grund- und Gegenkörper. Prinzipiell sind die vorherrschend wirkenden Mechanismen bei der Zerkleinerung, insbesondere von Prallplatten, Schlagmühlen und Backenbrechern die Abrasion und die Oberflächenzerrüttung. Untergeordnete Mechanismen sind die Adhäsion und vorkommende tribochemische Reaktionen (Sommer et al. 2010).

Der Verschleiß (in kg pro Tonne verarbeitetem Abfall) in Bezug auf die dazugehörigen Zerkleinerungsapparate und das jeweilige Ausgangsmaterial sind in Tabelle 54 zusammengestellt. Spezifische Verschleißwerte für die Verarbeitung von FVW sind nicht verfügbar. Da jedoch zu erwarten ist, dass durch die abrasive Wirkung der Verstärkungsfasern ein erhöhter Verschleiß an Schlag-, Prall- und Schneidelementen auftritt, ist eine konservative Betrachtung der Verschleißrate angemessen. Des Weiteren ist das Alter der erhobenen Daten zu beachten und kritisch zu hinterfragen.

Tabelle 54: Zuordnung Materialverschleiß und Zerkleinerungsapparat.

Typ	Materialverschleiß [kg/t]	Material	Umdrehung (1/min)
Hammermühle	0,024	Hausmüllfraktionen	1200
Hammermühle	0,015	Hausmüllfraktionen	790
Prallbrecher	0,09	Quarz	-

Quelle: Eigene Zusammenstellung, Fraunhofer-ICT, nach Trezek (1977) und Höffl (1986).

Die Untersuchungen von Trezek (1977) zeigen, dass die höhere Drehzahl der Hammermühle entscheidend zum Verschleiß beiträgt. Bei gleichen Bedingungen (bei 1200 U/min) zeigen nicht-gehärtete Hämmer im Vergleich zu den gehärteten Hämmern einen um bis zu 57 % größeren Verschleiß. Die Zerkleinerungsversuche aus dem ReRoBalsa Bericht bestätigen die Verschleißproblematik mit ungehärteten Hämmern, die im Zusammenhang mit abrasiv wirkenden Verbundmaterialien entstehen können (Fraunhofer-Institut für Holzforschung, Wilhelm-Klauditz-Institut (WKI) 2020). Aus diesem Grund sind gehärtete Hämmer und Schlagkörper, die bei der GFK– bzw. CFK-Zerkleinerung deutlich geringer verschlissen werden, zu bevorzugen. Bei der Zerkleinerung von harten Materialien, wie beispielsweise Quarz, kann ein umso größerer Verschleiß entstehen (Höffl 1986). Nach Trezek konnte für eine Gondard Hammermühle die Lebenszeit der Hämmer durch Aufschweißen um den Faktor 5 vergrößert werden. Demnach existieren noch härtere Aufschweißlegierungen, welche einen theoretischen Verschleißschutz von 100 bis 150% gegenüber den nicht gehärteten Hämmern aufweisen sollen.

Dies ist jedoch verknüpft mit höheren Kosten für die Aufpanzerung, was nicht für alle Anwendungen wirtschaftlich ist (Trezek 1977).

Der theoretische Verschleiß der Zerkleinerungswerkzeuge und der notwendige Instandhaltungsaufwand sind in Tabelle 55 aufgeführt. Die tabellarische Einstufung ist rein qualitativ mithilfe von Angaben aus der Literatur zusammengestellt. Die Einteilung erfolgt abgestuft von Minus nach Plus, wobei Minus weniger gut, bzw. ein größerer Aufwand der Instandhaltung und Plus gut und in der Instandhaltung ein kleinerer Aufwand bedeutet.

Tabelle 55: Zuordnung theoretischer Verschleiß und Zerkleinerungsapparat.

Typ	Bauweise	Verschleiß	Instandhaltung
Hammermühle (Tangentiale Zuführung)	Horizontal	-	-
Hammermühle (Mittlere Zuführung)	Horizontal	-	-/+
Vertikale Hammermühle (Bauart Tollemache)	Vertikal	-/+	--
Backenbrecher	Vertikal	+	+
Schneidmühle	Horizontal	--	--
QSZ	Vertikal	++	+

Quelle: Eigene Zusammenstellung, Fraunhofer-ICT, modifiziert nach Trezek (1977), Ananth und Shum (1976), Anastassakis (2007) und (Michaeli et al. 1993).

Entsprechend Tabelle 55 besitzen Schneidmühlen den höchsten Verschleiß, was nicht verwunderlich ist, da Schneidmesser als Zerkleinerungswerkzeug diesbezüglich anfällig sind. Ein mittlerer bis hoher Verschleiß zeichnet sich für Hammermühlen und der niedrigste Verschleiß für den QSZ ab. Durch die Prallbeanspruchungen im Mahlraum mit Mahlgut und Zerkleinerungshämmern bzw. Prallplatten entsteht ein intensiver Verschleiß der Bauteile. Dieser ist umso geringer, je mehr die einzelnen Partikel gegenseitig und nicht mit den Bauteilen des Apparats wechselwirken. Der hohe Verschleiß der Schneidmühle ergibt sich aus der sehr hohen Empfindlichkeit der Schneiden gegenüber den abrasiven FVW. Die vertikale Hammermühle zeigt einen geringeren Verschleiß als die horizontale Bauweise, welcher aus der Bauart mit immer kleiner werdenden Partikelgrößen resultiert.

Der Aufwand der Instandhaltung ist abhängig von der Zugänglichkeit des Mahlraums und der Zerkleinerungswerkzeuge. So sind der Mahlraum und die Lager der Drehwelle bei der vertikalen Hammermühle nur schwer zugänglich. Die Schneid- und Hammermühlen weisen einen mittleren bis hohen Instandhaltungsaufwand auf, wobei die Hammermühle mit mittlerer Zuführung einen etwas kleineren Instandhaltungsaufwand besitzt als die Mühlen mit tangentialer Zuführung. Infolge dieser mittleren Zuführung müssen beispielsweise die Hämmer innerhalb des Apparats bei zu hohem Verschleiß nicht gewechselt, sondern lediglich die Drehrichtung geändert werden, wodurch die Betriebszeit des Zerkleinerungsapparats erhöht werden kann. Der Instandhaltungsaufwand für den Backenbrecher ist gering, da es sich um ein offenes System handelt, bei dem die Platten oder bewegliche Bauteile schnell ausgewechselt werden können.

Einen geringen Instandhaltungsaufwand hat auch der QSZ, bei dem die Zerkleinerungsketten bzw. Schlagkörper (oder Bauteile am Lager durch die verkürzte Welle) schneller ausgetauscht werden können als bei vertikalen Hammermühlen (oder auch den horizontalen Hammermühlen mit durchgehender Wellen im Mahlraum).

5.5.4 Aufbereitungsverfahren

Nach Informationen aus der Literatur findet die Aufbereitung (im Rahmen der bekannten Verwertungswege aus Kapitel 6) rein trocken statt. Dies kann an den höheren Kosten für die nasse Zerkleinerung liegen, andererseits aber auch an dem höheren Nutzen in einer trockenen Fahrweise, wo das Zerkleinerungsgut nicht zusätzlich getrocknet werden muss. Im Fall einer kryogenen Zerkleinerung ergibt sich der Mehraufwand durch die Bereitstellung von flüssigem Stickstoff, die mit größerem Zerkleinerungsgrad durch die dissipierte Wärmeleistung unwirtschaftlich wird. Positive Aspekte der kryogenen Zerkleinerung von FVW liegen in dem besseren Aufschlussgrad sowie einer gleichmäßigeren Partikelgrößenverteilung (Martens und Goldmann 2016).

Bei einer nassen Zerkleinerung, die oft in der Feinstzerkleinerung Anwendung findet, müssen meist zusätzliche Trocknungskosten eingerechnet werden. Die nicht mechanische Nasszerkleinerung der elektrodynamischen Fragmentierung nimmt eine untergeordnete Rolle ein und wird in Kapitel 6.1.1 näher beschrieben. Technisch gesehen kann eine spezielle Fahrweise, wie sie bei der Zementroute existiert, bei der das Rotorblattmaterial mit feuchten Spuckstoffen vermischt wird, vorteilhaft sein, da dadurch Stäube besser gebunden werden (Schmidl und Hinrichs 2010). Eine zusätzliche Wasserbedüsung im Mahlraum in geschlossenen Systemen oder im Aufgabebereich bei offenen Systemen kann ebenfalls sinnvoll sein, sollte dabei die spätere Anforderung der maximalen Feuchte an das zerkleinerte Material nicht überschritten werden. So könnte eine nasse Zerkleinerung bei einer Verwertung mittels Solvolyse (Hydrolyse) geeignet sein, da hier der Wassergehalt des Abfallstroms eine untergeordnete Rolle spielt. Hersteller von Zerkleinerungsapparaten bieten bei mobilen Apparaten beispielsweise eine separate Wasserbedüsung meist im Aufgabebereich der Zerkleinerungsapparate an. Dadurch kann ein Teil der durch die Zerkleinerung entstehenden Staub- und Partikelemissionen gebunden werden. Für weitere Emissionsminderungsmaßnahmen und Auswahl der Düsenarten wird auf die VDI Richtlinie (2095 Blatt 1) verwiesen.

In einem von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt geförderten Projekt wurde eine nasse Zerkleinerung und Verarbeitung von CFK-Abfall untersucht (Kramer et al. 2020). Das Ergebnis bei der Zerkleinerung mit einer Rotorschere zeigt einen etwas höherer Energieaufwand und mehr Feingutanteil im Vergleich zur trocken-mechanischen Zerkleinerung. Vorteilhaft ist hierbei die Bindung der Staubpartikel während des nassen Verfahrens und dadurch minimierte Staubemissionen.

5.5.5 Wirtschaftlichkeit

Die Wirtschaftlichkeit wird im Hinblick auf die Verwertungsroute der mechanischen Zerkleinerung in Kapitel 6 über eine techno-ökonomische Bewerung näher betrachtet. Generell ist die Aussage möglich dass, unabhängig vom Verwertungsweg, hohe Durchsätze und damit hohe Kapazitätsauslastungen in der Aufbereitung von Rotorblattabfällen erwünscht sind, weil diese die Kosten beeinflussen. Als spezifische Kosten von Zerkleinerungsapparaten gelten Instandhaltungs-, Abschreibungs-, Rationalisierungs-, Lohn- und Energiekosten. Die Lohn- und Energiekosten sind, im Vergleich zu den übrigen Kostengrößen, unabhängig von der Apparatemasse (Höffl 1986). Zusätzliche Betriebskosten der Instandhaltung der Apparate

können beispielsweise mithilfe von schnell austauschbaren Mahl- oder Schneidwerkzeugen geringer gehalten werden (Bendel und Eyb 2011).

Ein weiterer Faktor für die Wirtschaftlichkeit ist der Absatz des erzeugten Produktes bzw. von Zwischenprodukten für eine weitere Verwertung. Ohne eine Marktdurchdringung können automatisch keine hohen Durchätze bzw. Absätze erreicht werden; was für eine Wirtschaftlichkeit der Anlage und das Unternehmen entscheidend sein kann.

5.5.6 Aufbereitungsziele

In Tabelle 56 sind die Vor- und Nachteile der jeweiligen Zerkleinerungsapparate als Zusammenfassung stichpunktartig zusammengestellt. Die Zerkleinerungsapparate für die Fein- und Feinstzerkleinerung sind nicht berücksichtig. Es wird dabei von einer Zerkleinerung von Rotorblattabfällen unterschiedlicher Zusammensetzung ausgegangen. Eine Unterscheidung zwischen GFK und CFK findet nicht statt, da das Zerkleinerungsverhalten der beiden Verbundmaterialien als ähnlich betrachtet werden kann. Es ist jedoch davon auszugehen, dass der spezifische Energiebedarf, der Verschleiß und der zusätzliche apparatetechnische Aufwand für CFK-haltiges Material generell höher ist als bei GFK-haltigem Abfallströmen (vgl. Abschnitt 5.5.1).

Tabelle 56: Vor- und Nachteile von Zerkleinerungsapparaten.

Zerkleinerungs-apparat	Vorteile	Nachteile
EWZ, MWZ	Großes Herstellerangebot Geringer Energiebedarf Gut geeignet für Vorzerkleinerung Unempfindlich gegenüber massiven Teilen (bei Austragfunktion)	Unvorteilhaft im kleinen Korngrößenbereich Mit mehr Wellen höherer Instandhaltungsaufwand Bei offenem System höhere Staubemissionen
QSZ	Niedriger Verschleiß und Instandhaltung Guter Aufschluss von Materialverbunden Geringer spezifischer Energiebedarf im Vergleich zu Hammermühlen Vorzerkleinerung evtl. nicht notwendig	Grenzen der PGV bei kleinen Korngrößen Massive Metallteile (Bolzen) können zur Störung des Zerkleinerungsvorgangs führen
Hammerbrecher	Bei hohen Durchsätzen geringe spezifische Energieverbräuche Vorzerkleinerung evtl. nicht notwendig	Mittlerer bis hoher Instandhaltungsaufwand Hohe Investitionskosten Trockene Fahrweise führt wahrscheinlich zu hoher Staubentwicklung bei FVK Zu großer Durchsatz verhindert die maximale Kapazitätsauslastung mit Rotorblattabfall
Hammer-, Prallmühle	Guter Aufschluss von Materialverbunden Kleine und große Durchsätze möglich je nach Hersteller Auch kleine PGV möglich	Maximale Aufgabegrößen verlangen meist eine Vorzerkleinerung Relativ hoher Verschleiß an Prallplatten und Schlagleisten
Schneidmühle	Engere PGV als bei Prall- und Hammermühle	Hoher Verschleiß der Schneiden und relativ hoher Instandhaltungsaufwand Eher ungeeignet für die Zerkleinerung von FVK

Zerkleinerungs-apparat	Vorteile	Nachteile
	Anwendung bei von Harz befreiten Rezyklat-Fasern möglich	

Quelle: Eigene Zusammenstellung, Fraunhofer-ICT.

Für die Vorzerkleinerung eignen sich EWZ und MWZ. Sie sind robust und haben zur Sicherung von Schäden an den Wellenkörpern meist einen Sicherheitsmechanismus verbaut, der verhindert, dass massive metallische Bestandteile der FVW die Apparate beschädigen. Bei schnell laufenden Hammerbrechern oder Hammermühlen existiert dieser Sicherheitsmechanismus hingegen nicht.

Nach aktuellem Stand der bisherigen Ergebnisse, Bewertungskriterien und Einordnungen ist der QSZ die erste Wahl für die Aufbereitung von Rotorblattabfällen. Eine Vorzerkleinerung kann beim Einsatz eines QSZ oder Hammerbrechers eventuell entfallen, die ansonsten in der Regel mit EWZ oder MWZ notwendig wird. Die Begrenzung des QSZ liegt jedoch in der kleinsten produzierbaren Korngröße, welche mit ca. 8 mm angegeben wird.

Für einen zweiten Zerkleinerungsschritt sind Hammermühlen bzw. Prallmühlen für den Grobmahlbereich empfehlenswert, die einen Kompromiss aus Robustheit und Flexibilität bieten. Nicht empfehlenswert für die Aufbereitung von Rotorblattabfällen sind Schneidmühlen, vor allem aufgrund des starken Verschleißes, welcher durch die abrasiven FVW hervorgerufen wird. Ausgehend von der Zerkleinerungsbeanspruchung sind die Hammerbrecher, Hammermühlen und QSZ empfehlenswert. Bei den größeren Hammerbrechern ist es unwahrscheinlich, mit reinen FVW eine volle Auslastung mit großen Durchsätzen, wie man sie für das Auto-Shredding kennt, zu erreichen. Da die Anforderungen an das Produkt hinsichtlich des Zerkleinerungsgrades unterschiedlich sein können, ist jedoch keine der oben genannten Zerkleinerungsapparate komplett auszuschließen und jeweils abhängig von den folgenden Verwertungswegen und Produktkriterien, bzw. Rezyklatanforderungen.

Prozessverluste von ca. 1 % pro Zerkleinerungsdurchgang sind annehmbar für den kompletten Vergleich der späteren Prozessroutenbewertung und der Berechnung einer Recyclingquote für den speziellen Anwendungsfall.

5.6 Resümee und Handlungsempfehlungen

Die bei einem Verwerter angelieferten Rotorblattstücke müssen im Rahmen einer zweiten Zuschnittstufe mithilfe von Kreissägen oder alternativen Demontagetechniken sowie mit hydraulischen Scheren oder Trennschleifern auf eine benötigte Aufgabegröße von Zerkleinerungsaggregaten von ca. 1 m vorzerkleinert und für die Entnahme und Separierung der verbauten Metalle aufgebrochen werden. Durch den Einsatz von hydraulischen Scheren können die Rotorblattstücke, durch die einwirkende Scherwirkung, zusätzlich delaminiert werden, was eine Separation der verbauten Metallteile erleichtert. Nach der Zerkleinerung und dem Aufbruch des Rotorblattverbundes müssen die verklebten Metallteile im Inneren, wie z. B. massive Verbindungsbolzen und Metallflanschringe, entfernt werden. Weniger massive Metallteile, wie beispielsweise verbaute Stahl- und Aluminiumschienen oder Kupferleitungen, sind bei diesem Arbeitsschritt ebenfalls manuell abzutrennen. Diese sortenreine händische Metallabtrennung vor der ersten Zerkleinerungsstufe ist notwendig, um nachfolgend im Rahmen der Zerkleinerung der FVW möglichst metallfreie GFK- bzw. CFK-haltige Materialströme zu garantieren und die eingesetzten Zerkleinerungsapparate vor einer Schädigung durch größer Metallteile zu schützen. Weiterhin sind Metalle bei allen weiteren Verwertungsrouten als

Prozessstörstoffe zu nennen. In extra dafür hergestellten Unwuchtkammern können zum Teil auch Unwuchtschrote aus Metall-, Epoxid- oder Bleischrot insbesondere in der Rotorblattspitze verbaut sein. Hier sollten die Zuschnitte möglichst genau erfolgen, um die Schrote eventuell von Hand entfernen zu können. Im Falle von verbauten Bleischroten muss eine Schadstoffentfrachtung erfolgen.

Insgesamt wird von mindestens zwei Zerkleinerungsstufen ausgegangen, die notwendig sind, um FVW von Rotorblättern auf eine verwertbare Korngröße zu verkleinern. Die Ausnahme stellt die Verwertung der Rezyklate zu Füllstoffen bzw. zu Kurz-Rezyklatfasern dar, im Rahmen derer mindestens eine weitere Zerkleinerungsstufe benötigt wird. Es wird empfohlen, eine erste Zerkleinerung der FVW mithilfe eines QSZ durchzuführen. Gründe hierfür sind 1) der höhere bis große Leistungsbereich, 2) der hohe Durchsatz, 3) der relativ geringe spezifische Energiebedarf, 4) der geringe Verschleiß sowie 5) der vergleichsweise geringe Instandhaltungs-, Wartungs- und Reparaturaufwand dieser Zerkleinerungstechnologie. Im QSZ können aufgrund der Größe des Mahlraums theoretisch Rotorblattstücke mit einem Durchmesser von 900 bis 2540 mm aufgegeben und zerkleinert werden. Um ein Verkanten der Hohlraumkörper im Mahlraum zu vermeiden, wird empfohlen, nur halb so große Stücke mit Durchmesser von 450 bis 1270 mm aufzugeben. Sind die Rotorblattstücke nach dem ersten (auf Transportlänge) oder zweiten (zur Aufgabe und Metallentfrachtung) Zuschnitt jedoch zu groß für die Aufgabe in den QSZ, kann eine erste Zerkleinerung der Rotorblattabfälle auch mittels EWZ bzw. MWZ und erst anschließend eine zweite Zerkleinerung mittels QSZ erfolgen. Als zweite bzw. dritte Zerkleinerungsstufe können Hammermühlen eingesetzt werden. Nach den jeweiligen Zerkleinerungsstufen muss eine Metallabscheidung mithilfe von Fe-Metallabscheidern (Überbandmagnetabscheider) oder NE-Metallabscheidern (Wirbelstromabscheider) erfolgen, um am Ende der Aufbereitung eine vollständige Metallentfrachtung zu erreichen.

Aufgrund der abrasiven Eigenschaft der FVWK sollte der Mahlraum der Zerkleinerungsapparate mit einem entsprechenden Verschleißschutz (z. B. Aufpanzerung der Schlag- und Prallkörper, verstärkte Verschleißelemente, etc.) aufgerüstet sein, um einen kontinuierlichen und langlebigen Betrieb der Zerkleinerungsapparate zu gewährleisten. Die schnelllaufenden Zerkleinerungsapparate sollten aufgrund der erhöhten Staubemissionen eingehaust betrieben werden. Hilfreich könnte eine zusätzliche Wasserbedüsung sein sowie eine Absaugung und Entstaubung der Abluft. Im Fall der Zementroute kann diese Bedüsung entfallen, da mit feuchten Abfällen aus der Papierindustrie (sogenannte Spuckstoffe) die Stäube im QSZ teils gebunden werden. Die Aufbereitung sollte nach der Demontage und dem Abtransport möglichst am Standort des Verwerters und Recyclers stattfinden, um Emissionen und Umweltbelastungen durch eine fachgerechte Aufarbeitung in geschlossenen Räumen gering zu halten. Um eine Vermischung von GFK und CFK bei gleichbleibender Rezyklatqualität auszuschließen, bedarf es einer sortenreinen Abtrennung schon vor dem Verwertungsprozess bzw. bestenfalls vor der ersten Zerkleinerungsstufe, da sich die Trennung bei einem Gemisch aus Rezyklatglasfasern (rGF) und Rezyklatcarbonfasern (rCF) deutlich schwieriger gestaltet.

Die Größe des Zerkleinerungsapparats beeinflusst maßgeblich den Durchsatz und den spezifischen Energiebedarf der Zerkleinerungstechnologie. Der Anwender muss somit das regionale Rotorblattaufkommen bzw. die verwertbaren GFK- und CFK-Abfälle miteinbeziehen, um darüber eine Anpassung der Anlagengröße der Zerkleinerungsapparate vornehmen zu können. Nur eine hinreichende Auslastung der Kapazitäten reduziert die auf den Abfall bezogenen variablen Kosten, wobei die Frage der Wirtschaftlichkeit nur mithilfe einer gesamtheitlichen Prozesskettenbewertung beantwortet werden kann. Hierzu zählen der Demontageaufwand inklusive des Transports, die Aufbereitung und die Verwertung der Rotorblattabfälle.

Aufgrund der Komplexität und variierenden Materialzusammensetzung von Rotorblättern kann die optimale Aufgabengröße der Rotorblattabfälle für alle genannten Zerkleinerungsapparate nur mithilfe des Trial and Error-Ansatzes und Versuchen genauer festgelegt werden. Aus diesem Grund besteht auf dem Gebiet der Zerkleinerung von Rotorblattmaterialien weiterhin Forschungs-, bzw. Entwicklungsbedarf. Um zukünftig ausreichende Vergleiche anstellen zu können ist es notwendig bei Untersuchungen eine Mindestanzahl an Prozessparametern zu berücksichtigen:

- Bezeichnung und Typ der verwendeten Zerkleinerungsapparate sowie genaue Informationen über die Zusammensetzung des zu zerkleinernden Materials.
- Ermittlung und Angabe des Zerkleinerungsgrades sowie des spezifischen Energieverbrauchs unter Angabe des erfolgten Durchsatzes.
- Angabe von charakteristischen Merkmalen des Zerkleinerungsguts wie beispielsweise die Äquivalenzdurchmesser x_{50}[7], x_{75} oder x_{25} vor und nach der Zerkleinerung und Nennung der verwendeten Messmethode.
- Benennung des Probenortes am Rotorblatt des zu zerkleinernden Probenmaterials (Rotorblattkante, Holm, Steg, Rotorblattspitze, etc.), Angabe der Rotorblattdicke.

Zusammenfassend kann gesagt werden dass, ausgehend von den Demontageschnitten und den Qualitätsanforderungen der Rezyklate für die jeweiligen Verwertungsszenarien, die Zerkleinerung und Sortierung essentielle Prozesse darstellen, um die technischen, ökonomischen und ökologischen Anforderungen an eine möglichst sortenreine Aufbereitung zu gewährleisten.

[7]Die Zahl beschreibt den Median des Korn-, bzw. Teilchenäquivalentdurchmesser. Zum Beispiel sagt die Zahl 25 aus, dass 25 % der Teilchendurchmesser zu der Verteilungssumme gehören.

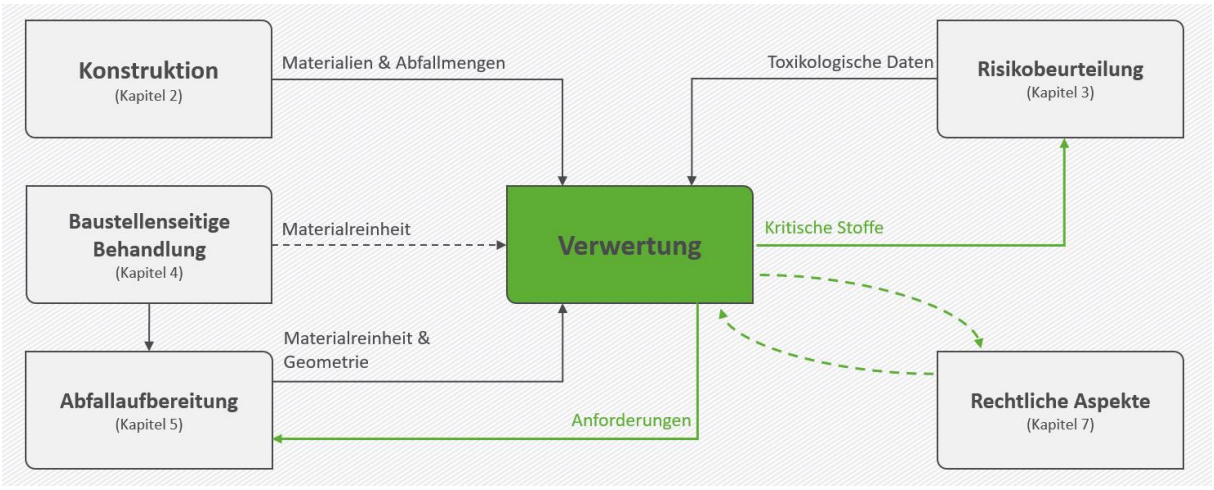
6 Verwertung aufbereiteter Rotorblattabfälle

Im Folgenden wird die „Verwertung aufbereiteter Rotorblattabfälle“ beschrieben, wobei für diese Beschreibung Inputdaten aus den vorangegangenen Kapiteln notwendig sind. Eine möglichst hochwertige Verwertung von Rotorblattabfällen bedingt sowohl Kenntnisse zu den Materialströmen, als auch zur Konstruktion und Materialzusammensetzung der Rotorblätter. Weitere Informationen sind insbesondere bezüglich der verwertungsspezifischen Aufbereitung der Rotorblattabfälle notwendig, was einen interaktiven Prozess darstellt. Bei der Verwertung sind rechtliche Aspekte, insbesondere bezüglich des Kreislaufwirtschaftsgesetzes (KrWG) zu beachten sowie die ordnungsgemäße und schadlose Verwertung zu berücksichtigen.

Ein Verwertungsprozess kann nicht als alleinstehendes Verfahren betrachtet werden, das losgelöst von anderen Aspekten durchgeführt werden kann. Ziel ist eine hochwertige Verwertung, die wie in Abbildung 135 dargestellt, einem Recycling in der Abfallhierarchie entspricht, was als stoffliche Verwertung bezeichnet wird. Diese stoffliche Verwertung führt zu einem recycelten Produkt (Rezyklat), das zu vermarkten ist, sodass die Qualität des Produkts maßgeblich den Prozess zur Aufbereitung und Verwertung beeinflussen kann. Hierzu sind Ziele für die Verwertung zu definieren und Bewertungskriterien zu erstellen.

Diese Zusammenhänge, dass für eine Verwertung die Rotorblattkonstruktion, mit deren Materialien und Materialzusammensetzung, die künftig zu erwartenden Abfallströme, die baustellenseitige Abfallbehandlung und Aufbereitung von Rotorblattabfällen einen Einfluss haben, ist in Abbildung 134 dargestellt. Gleichsam sind Ergebnisse der Verwertung ein wichtiger Bestandteil, um Handlungsempfehlungen zur Konstruktion und dem Rückbau von Rotorblättern von Windenergieanlagen (WEA) aussprechen zu können. Eine enge Abstimmung ist mit allen Themen zum Rückbau und zur Verwertung von Rotorblättern notwendig, was auch eine Risikobeurteilung von Fasern und Stäuben sowie die Organisationsverantwortung betreffen.

Abbildung 134: Informationsaustausch des Themas Verwertung mit den weiteren wissenschaftlichen Themen im Rahmen des Gesamtprojekts.



Quelle: Eigene Darstellung, KIT-ITC.

Ziele sind eine Identifikation relevanter Prozesse zur Verwertung aufbereiteter Rotorblatt-abfälle, deren technische Beurteilung inklusive der Zuordnung zu einem Technologiereifegrad („Technology Readyness Level“, TRL) sowie die Durchführung einer technoökonomischen Bewertung. Die Einordnung der identifizierten Prozesse muss unter Beachtung der Bestimmungen des Kreislaufwirtschaftsgesetzes (KrWG) zur Abfallhierarchie des § 6 KrWG, der

Grundpflichten des § 7 KrWG und der Anforderungen zur Hochwertigkeit nach § 8 KrWG sowie des einschlägigen untergesetzlichen Regelwerks erfolgen.

6.1 Bewertungskriterien zur Prozessbeurteilung

Im Folgenden werden Kriterien zur Durchführung einer technischen Beurteilung von Verwertungsprozessen aufgeführt und an Beispielen verdeutlicht. Diese kann allgemein nicht losgelöst von einer rechtlichen Betrachtung erfolgen, weshalb rechtliche Rahmenbedingungen auch Grundlage der technischen Beurteilung sind und hierzu eine ausführliche Betrachtung dieser Rechtsgrundlagen im Kapitel 7 zur Organisationsverantwortung erfolgt.

Darüberhinaus werden weitere Kriterien definiert und erläutert, anhand derer wesentliche Rahmenbedingungen zu den prozessspezifisch notwendigen Anforderungen an die Verwertung sowie zur Risikobeurteilung von Fasern und Stäuben abgeleitet werden können.

6.1.1 Technische Beurteilung der Verwertungsprozesse

Identifizierte Verwertungsverfahren werden zunächst entsprechend der fünfstufigen Abfallhierarchie nach §6 des Kreislaufwirtschaftsgesetzes (KrWG) kategorisiert. Entsprechend dieser Hierarchie sind die Rangfolge an Maßnahmen zur Vermeidung und Entsorgung von Abfällen nach § 6 Abs. 1 KrWG festgelegt, und die Legaldefinitionen des § 3 KrWG für die einzelnen Maßnahmen der Vermeidung und der Abfallbewirtschaftung sind dabei zu beachten.

An oberster Stufe der Abfallhierarchie steht die Abfallvermeidung, inkl. der Wiederverwendung. Auf Stufe zwei folgt die Vorbereitung zur Wiederverwendung, die u. a. Verfahren zur Reparatur beinhaltet. Das Recycling folgt auf Stufe drei, gefolgt von der sonstigen Verwertung auf Stufe vier. Abschließend folgt auf Stufe 5 die Abfallbeseitigung, die beispielsweise die Deponierung beinhaltet (Abbildung 135).

Nach § 3 Abs. 19 KrWG zählen zur Kreislaufwirtschaft die Vermeidung und Verwertung von Abfällen und damit die Stufen 1 bis 4 entsprechend der Abfallhierarchie. Zur Abfallentsorgung zählen nach § 3 Abs. 22 Verwertungs- und Beseitigungsverfahren, einschließlich der Vorbereitung zur Verwertung oder Beseitigung, und damit Stufen 2 bis 5 des § 6 Abs. 1 KrWG. Weiterhin bezeichnet der Begriff Verwertung nach § 3 Abs. 23 S. 1 KrWG jedes Verfahren, als dessen Hauptergebnis die Abfälle innerhalb der Anlage oder in der weiteren Wirtschaft einem sinnvollen Zweck zugeführt werden, indem sie entweder andere Materialien ersetzen, die sonst zur Erfüllung einer bestimmten Funktion verwendet worden wären, oder indem die Abfälle so vorbereitet werden, dass sie diese Funktion erfüllen. Dazu gehören alle Prozesse der Stufen 2 bis 4 des § 6 Abs. 1 KrWG. Zur stofflichen Verwertung zählen nach § 3 Abs. 23 a S. 1 KrWG alle Verwertungsverfahren mit Ausnahme der energetischen Verwertung und der Aufbereitung zu Materialien, die für die Verwendung als Brennstoff oder als anderes Mittel der Energieerzeugung bestimmt sind. Die stoffliche Verwertung umfasst somit nach § 3 Abs. 23 a S. 2 KrWG insbesondere die Vorbereitung zur Wiederverwendung, das Recycling und die Verfüllung. Verfahren der stofflichen Verwertung können als Vorbereitung zur Wiederverwendung, als Recycling oder bei der Verfüllung gegenüber der energetischen Verwertung vorrangig sein. Die sonstige Verwertung in Form der energetischen Verwertung oder Verfüllung sind bezüglich der Stufe gemäß § 6 Abs. 1 KrWG grundsätzlich gleichrangig und gegenüber dem Recycling nachrangig sowie gegenüber der Beseitigung vorrangig.

Zwingend erforderlich ist nach § 6 Abs. 2 KrWG zusätzlich die Betrachtung der Auswirkungen der Maßnahmen bzw. Prozesse auf Mensch und Umwelt, beispielsweise die zu erwartenden Emissionen oder eine Anreicherung von Schadstoffen in Erzeugnissen. Ausgehend von der Rangfolge nach § 6 Abs. 1 KrWG soll nach Maßgabe der §§7 und 8 KrWG diejenige Maßnahme

Vorrang haben, die den Schutz von Mensch und Umwelt bei der Erzeugung und Bewirtschaftung von Abfällen unter Berücksichtigung des Vorsorge- und Nachhaltigkeitsprinzips am besten gewährleistet. Für die Betrachtung der Auswirkungen auf Mensch und Umwelt nach § 6 Abs. 1 S. 1 KrWG ist der gesamte Lebenszyklus des Abfalls zugrunde zu legen. Hierbei sind insbesondere 1) die zu erwartenden Emissionen, 2) das Maß der Schonung der natürlichen Ressourcen, 3) die einzusetzende oder zu gewinnende Energie sowie 4) die Anreicherung von Schadstoffen in Erzeugnissen, in Abfällen zur Verwertung oder in daraus gewonnenen Erzeugnissen (§ 6 Abs. 2 S. 3 KrWG) zu berücksichtigen. Die technische Möglichkeit, die wirtschaftliche Zumutbarkeit und die sozialen Folgen der Maßnahme sind nach § 6 Abs. 2 S. 4 KrWG außerdem zu beachten.

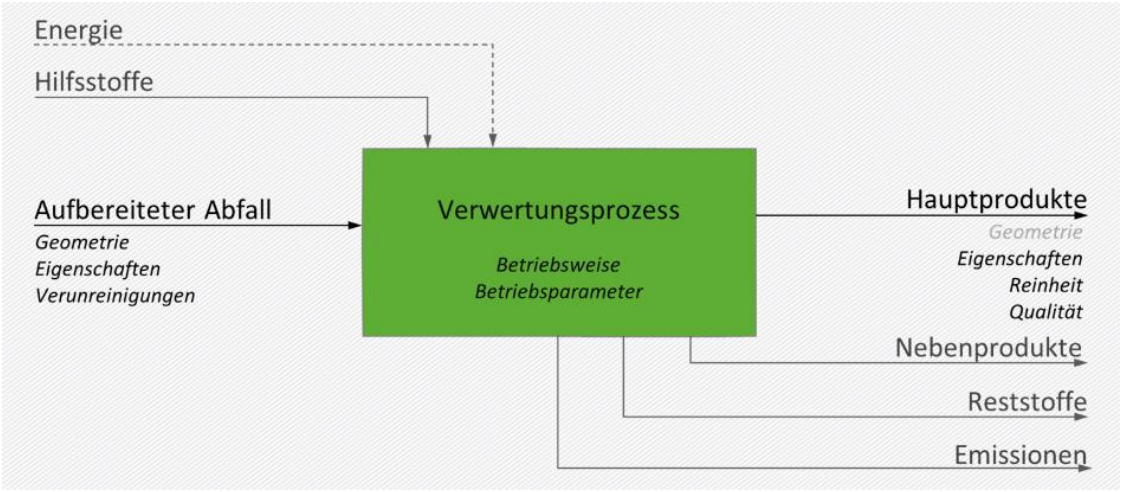
Abbildung 135: Abfallhierarchie nach §6 Abs. 1 des Kreislaufwirtschaftsgesetzes (KrWG), inkl. gekürzter und vereinfachter Begriffsdefinitionen nach §3 KrWG.

Quelle: Eigene Darstellung, KIT-ITC.

Die Durchführung einer technischen Beurteilung von Verwertungsprozessen der beim Rückbau von Rotorblättern anfallenden Abfallströme ist nur für solche möglich, die vollständig zu beschreiben sind. Dies bedeutet, dass zumindest die wesentlichen Stoff- und Energieströme sowie relevante Prozessparameter bekannt sein müssen. Idealerweise sind weiterhin Daten u. a. zu Hilfsstoffen, Nebenprodukten und Emissionen verfügbar. Sind diese Daten vollständig verfügbar, so können daraus Material- und Energiebilanzen aufgestellt werden, die Voraussetzung für eine vollständige Prozessbewertung sind (Abbildung 136). Hierbei ist zu beachten, dass die Begriffe (u. a. Hauptprodukte, Nebenprodukte) aus technischer Sicht und nicht aus rechtlicher Sicht definiert sind.

Wenn Prozesse nicht oder nur teilweise beschreibbar sind, werden, wann immer möglich, entsprechende Annahmen getroffen, und Aussagen zur technischen Beurteilung sind dann mit einer entsprechenden Unsicherheit versehen.

Abbildung 136: Erforderliche Daten für eine vollständige Bilanzierung eines Verwertungsprozesses.



Quelle: Eigene Darstellung, KIT-ITC.

Dabei werden zur technischen Beurteilung von Verwertungsprozessen, bei denen der Erhalt des Werkstoffes das Ziel ist, Literaturdaten herangezogen, um beispielsweise die Einsparung von Ressourcen gegenüber der Primärroute oder die Qualität des Rezyklates gegenüber dem Primärmaterial aufzuzeigen.

Für Verwertungsprozesse, in denen der Abfall ein anderes Material zur Erfüllung einer bestimmten Funktion substituieren soll, werden die relevanten Eigenschaften der aufbereiteten Abfallstoffe mit den Eigenschaften derjenigen Stoffe verglichen, die im Prozess standardmäßig zur Erfüllung dieser Funktion eingesetzt werden. So werden in verschiedenen Industrieprozessen beispielsweise Kohlen oder Kokse als Reduktionsmittel eingesetzt; diese Stoffe können theoretisch durch carbonfaserhaltige Abfälle substituiert werden, die allgemein einen hohen Kohlenstoffgehalt aufweisen. Eine solche Verwendung erfordert unter anderem einen geringen Störstoffgehalt, wie beispielsweise vollständige Freiheit von Nichteisenmetallen. Rezyklate müssen qualitätssichernd geprüft werden und deren Materialeigenschaften denen von Neuware gegenübergestellt werden. Dazu gehören beispielsweise erlaubte Partikelgrößen, Schütt- und Fließeigenschaften oder die erforderliche Reaktivität des Materials unter entsprechenden Prozessbedingungen.

Detaillierte Daten und Parameter industrieller Anlagen sind meist nicht öffentlich verfügbar, da es sich allgemein um firmenspezifisches Know-How handelt. Eine technische Bewertung ist deshalb für viele Prozesse nicht möglich, da nicht alle erforderlichen Daten zur Erstellung von Material- und Energiebilanzen verfügbar sind. Allerdings können Prozesse anhand von Abschätzungen und allgemein verfügbaren Informationen beurteilt werden. Zum Beispiel sind für den Prozess des Strahlrecyclings, der allgemein im Elektrolichtbogenofen erfolgt, die grundlegenden Prinzipien inkl. der wesentlichen Reaktionen in der Literatur beschrieben, ebenso sind Abschätzungen zu den wesentlichen Material- und Energieströmen veröffentlicht. Damit sind für einen solchen Verwertungsprozess ausreichende Grundlagen für eine technische Prozessbeurteilung vorhanden.

Für Prozesse mit einer ausreichenden Datenverfügbarkeit muss nachfolgend zunächst geprüft werden, ob die Grundpflichten der Kreislaufwirtschaft nach § 7 KrWG erfüllt sind. So sind nach §7 Abs. 2 KrWG die Erzeuger oder Besitzer von Abfällen zu deren Verwertung verpflichtet, wobei der Abfall auch beseitigt werden kann, wenn dies *„den Schutz von Mensch und Umwelt […] am besten gewährleistet.*“. Zusätzlich gilt nach § 7 Abs. 3 KrWG, dass die Abfallverwertung ordnungsgemäß und schadlos zu erfolgen hat. Eine ordnungsgemäße Verwertung erfolgt, wenn

sämtliche öffentlich-rechtlichen Vorgaben (u. a. KrWG) eingehalten werden. Die Verwertung ist schadlos, *„wenn nach der Beschaffenheit der Abfälle, dem Ausmaß der Verunreinigungen und der Art der Verwertung Beeinträchtigungen des Wohls der Allgemeinheit nicht zu erwarten sind, insbesondere keine Schadstoffanreicherung im Wertstoffkreislauf erfolgt.“*. In § 7 Abs. 4 KrWG wird schließlich geregelt, dass bei technischer Möglichkeit und wirtschaftlicher Zumutbarkeit die Pflicht zur Abfallverwertung erfüllt werden muss. Dabei ist die technische Möglichkeit auch dann gegeben, wenn eine Vorbehandlung erforderlich wird. Die wirtschaftliche Zumutbarkeit definiert, dass die Verwertungskosten im Verhältnis zur Abfallbeseitigung stehen müssen, aber hierbei ein vorhandener oder zu schaffender Markt für gewonnene Stoffe oder gewonnene Energie berücksichtigt werden muss. Für Prozesse, die die Abfälle vollständig verwerten, wird der Entwicklungsstand geprüft, da hierüber abzuschätzen ist, wann mit einer Marktreife des Prozesses gerechnet werden kann. Dies kann entsprechend der Eingruppierung der Verfahren beispielsweise in Anlehnung an die Bewertungsgrundlagen für europäische Forschungsprojekte erfolgen (Europäische Kommission 2017), wo der Technologiereifegrad (engl. Technology Readiness Level, TRL) eines Prozesses in einer neunstufigen Skala einsortiert ist, wobei jede Stufe wichtige Merkmale und Meilensteine in der Entwicklungs- bzw. Validierungsphase des Prozesses, bzw. dessen Markteinführung, enthält (Tabelle 57). Dabei steigt der Reifegrad von TLR 1, dem Nachweis der Grundprinzipien, zu TRL 9, dem kommerziellen Betrieb, an. Zusätzlich können die verschiedenen TRL Stufen verschiedenen Forschungskategorien zugeordnet werden, wobei TRL 1 als Grundlagenforschung definiert wird, die Technologiereifegrade 2 bis 4 als industrielle Forschung bezeichnet werden, und die Stufen 5 bis 8 der experimentellen Entwicklung entsprechen. Die Forschungskategorie des TRL 9 entspricht der Markeinführung (Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG 2015).

Tabelle 57: Skala zur Einordnung des Technologiereifegrades (TRL) von Verfahren.

TRL	
1	Nachweis der Grundprinzipien
2	
3	Experimenteller Nachweis des Technologiekonzepts auf Komponentenebene
4	
5	Funktionsnachweis der Technologie in einer simulierten, dem späteren Einsatz entsprechenden Umgebung
6	
7	Demonstration eines Prototyps in der Einsatzumgebung
8	
9	System hat sich in Einsatzumgebung bewährt; kommerzieller Einsatz

Quelle: Gekürzte Zusammenstellung, KIT-ITC, nach Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG (2015).

Für Prozesse, die kommerziell eingesetzt werden (TRL 9), wird geprüft, ob die zur Verfügung stehende Anlagenkapazität zur Behandlung der aktuellen und zukünftigen Abfallmengen aus Rotorblättern ausreichend sind. Hierbei muss zusätzlich beachtet und abgeschätzt werden, ob auch aus anderen Industriebereichen mit steigenden Abfallmengen zu rechnen ist, die in den jeweiligen Verwertungsanlagen behandelt werden müssen und es zu Konkurrenzsituationen und Engpässen kommen kann.

Für Prozesse die bisher nicht kommerziell eingesetzt werden wird geprüft, ob deren Technologie in einer simulierten Umgebung entsprechend dem späteren Einsatz demonstriert wurde, die also einen TRL ≥ 6 aufweisen. Ist dies der Fall, scheinen diese Prozesse geeignet, um die in den kommenden Jahren anfallenden Abfallmengen verwerten zu können. Prozesse mit einem niedrigeren TRL sind dazu nicht geeignet, und alternative Verfahren bzw. weiterführender Forschungsbedarf werden benannt.

Für Prozesse mit ausreichender Kapazität bzw. einem hohen Technologiereifegrad sollte abschließend die Hochwertigkeit nach § 8 KrWG betrachtet werden. Hier gilt, dass eine den Schutz von Mensch und Umwelt am besten gewährleistende, hochwertige Verwertungsmaßnahme anzustreben ist, wobei der Abfallerzeuger oder -besitzer bei mehreren gleichrangigen Verwertungsmaßnahmen ein Wahlrecht besitzt. Die Definition der Hochwertigkeit kann hier beispielsweise eine Schonung oder erneute Nutzung von Ressourcen beinhalten. Weiterhin kann hier eine Unterscheidung von Recyclingprozessen nach „Upcycling“, bzw. „Upgrading“ und „Downcycling“ bzw. „Downgrading“ erfolgen. Diese Begriffe sind rechtlich nicht definiert, werden in der Literatur jedoch häufig zur subjektiven Beurteilung von Recyclingprozessen angeführt.

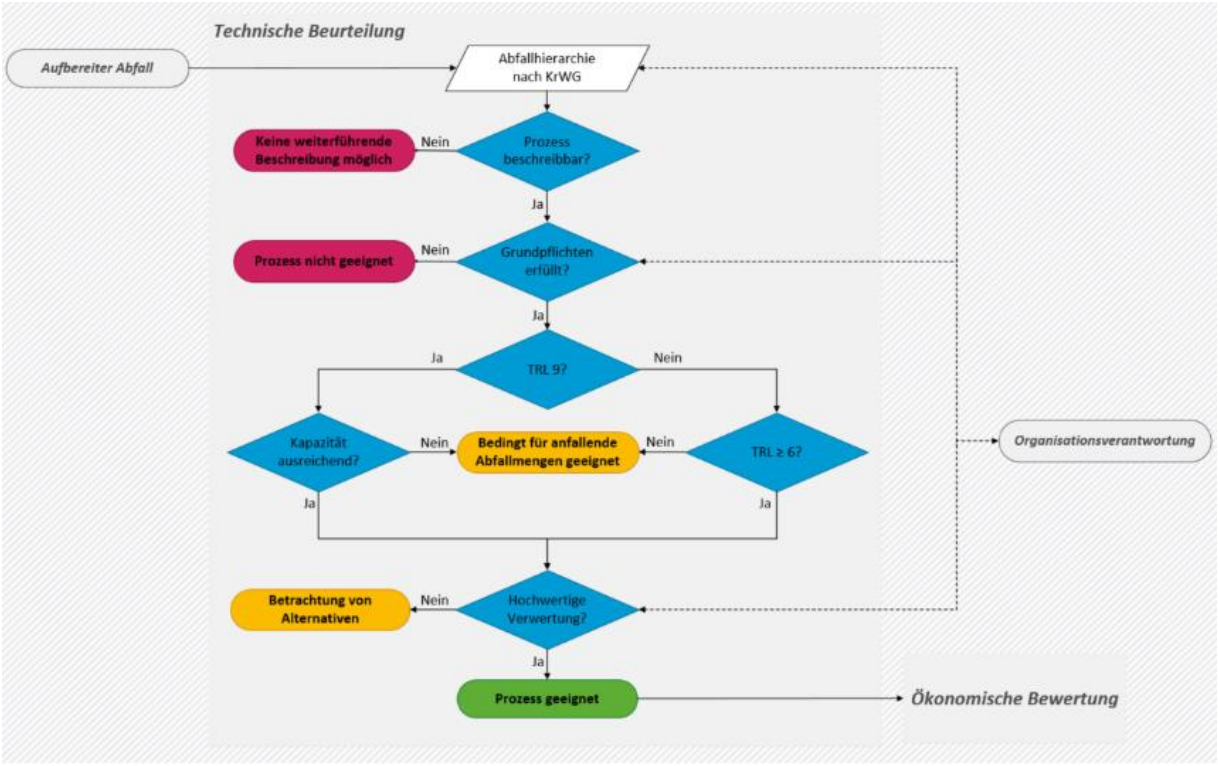
Aus den genannten Kriterien ergibt sich für die technische Beurteilung der Prozesse zur Verwertung der zu betrachtenden, aufbereiteten Abfallströme aus Rotorblättern das in Abbildung 137 dargestellte Ablaufdiagramm.

Die Ergebnisse der technischen Beurteilung werden materialspezifisch zusammengefasst und der weiterführende Forschungsbedarf benannt, falls die Datenlage eine abschließende technische Beurteilung vielversprechender Prozesse nicht zulässt.

Es ist davon auszugehen, dass nicht alle Kriterien für alle Prozesse recherchiert und bewertet werden können und Prozesse die bisher nur im Labormaßstab untersucht wurden, können nicht beurteilt werden.

Anhand verfügbarer Daten sollen mindestens drei Verfahren für eine vertiefende Analyse als Prozessroute ausgewählt werden, idealerweise ein Verfahren zum Metallrecycling sowie je ein Verwertungsprozess für carbonfaserverstärkte Kunststoffe (CFK) und glasfaserverstärkte Kunststoffe (GFK). Diese Analysen sollen neben dem Verwertungsverfahren auch die baustellenseitige Behandlung sowie die Abfallaufbereitung beinhalten, und somit die gesamte Prozesskette abdecken.

Abbildung 137: Kriterien und Ablauf zur Durchführung der technischen Beurteilung von Prozessen zur Verwertung aufbereiteter Abfälle aus Rotorblättern.



Quelle: Eigene Darstellung, KIT-ITC.

6.1.2 Rahmenbedingungen zur Abfallaufbereitung und zur Risikobeurteilung

Technische Prozesse haben allgemein definierte Anforderungen an die einzusetzenden Roh- und Hilfsstoffe. Diese Anforderungen können gering sein, wie beispielsweise hinsichtlich der Zusammensetzung und des Heizwerts von Hausmüll zur energetischen Verwertung in Abfallverbrennungsanlagen, oder strikt, wie beispielsweise in pharmazeutischen Prozessen. Dementsprechend sind bei den meisten technischen Prozessen die maximal zulässigen Gehalte an Fremdstoffen bzw. Verunreinigungen begrenzt.

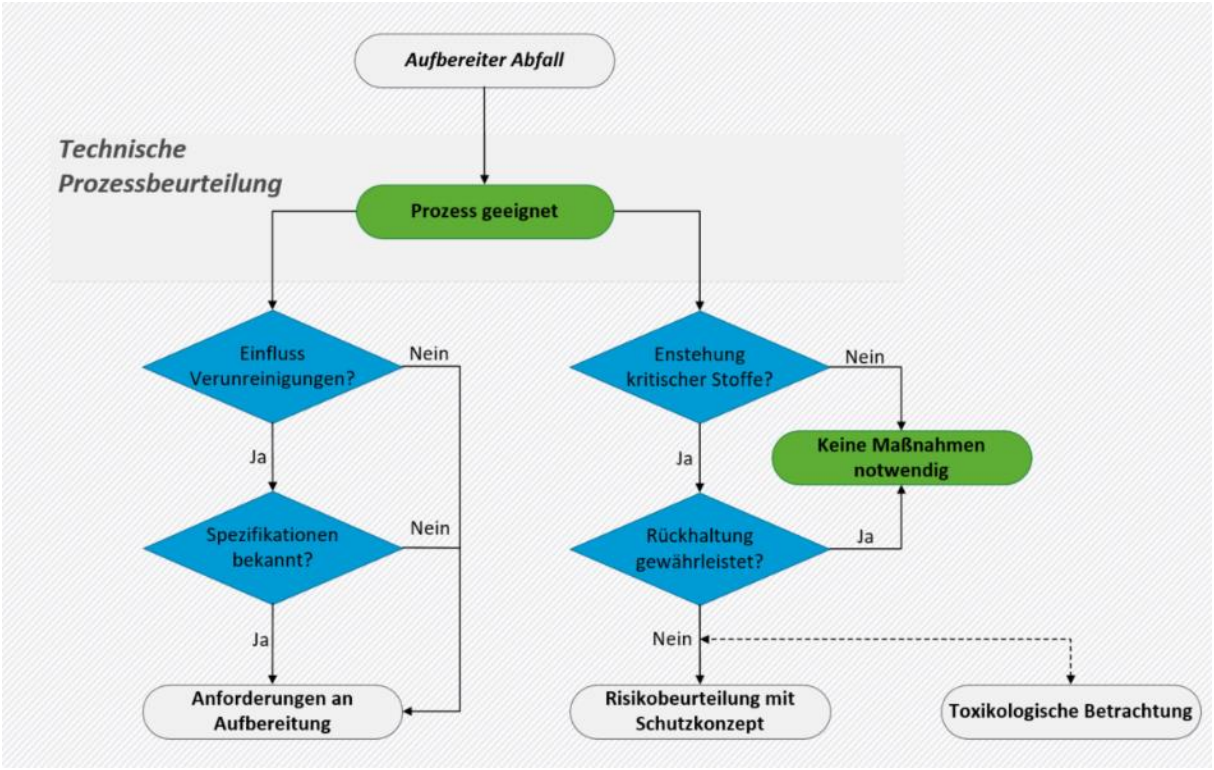
Für geeignete Verwertungsprozesse muss geprüft werden, ob und in welchem Maße Verunreinigungen einen Einfluss auf die Prozessführung sowie die Qualität der Haupt- und Nebenprodukte haben. Weiterhin muss geprüft werden, ob für die jeweiligen Prozesse Spezifikationen für die Einsatzstoffe bzw. die Produkte vorliegen. Für Edukte können dies beispielsweise die chemische Zusammensetzung, brennstofftechnische Eigenschaften oder deren Größenverteilungen sein. Für Produkte, wie zum Beispiel Recyclingmetalle, spielt unter anderem der Gehalt an Legierungsbestandteilen eine wichtige Rolle. Die Beantwortung dieser Fragen zu Verunreinigungen und Spezifikationen ist wichtig für die der Verwertung vorausgehenden Schritte der Abfallaufbereitung und letztlich deren Kosten. Je strikter diese Anforderungen des jeweiligen Verwertungsprozesses sind, desto höher sind die entsprechenden Anforderungen an die Qualität der aufbereiteten Abfallströme. Sind für einen Verwertungsprozess, der zur Behandlung aufbereiteter Abfallfraktionen geeignet scheint, keine Daten zum Einfluss von Verunreinigungen oder deren Spezifikationen bekannt, werden Empfehlungen für einen weiteren Forschungsbedarf benannt.

Neben diesen Betrachtungen werden die identifizierten und beschreibbaren Prozesse hinsichtlich der Entstehung kritischer Stoffe untersucht. So können sich in den

prozessspezifischen Reststoffen beispielsweise ungewünschte Bestandteile wie Stäube und Fasern anreichern oder Nebenprodukte entstehen, die ein Gefährdungspotential für die Umwelt darstellen, wie beispielsweise die beim Aluminiumrecycling anfallenden Salzschlacken. Für solche Stoffe wird geprüft, ob sie sicher zurückgehalten und entsorgt werden können. Die Informationen, die aus diesen Betrachtungen gewonnen werden, dienen als Datengrundlage für eine Risikobeurteilung.

Eine Übersicht der wesentlichen Fragen und des Informationsflusses neben der technischen Prozessbeurteilung ist in Abbildung 138 dargestellt.

Abbildung 138: Kriterien und Ablaufplan zur Recherche von Prozessanforderungen und Entstehung, bzw. Rückhaltung kritischer Stoffe für geeignete Prozesse der Verwertung aufbereiteter Rotorblattabfälle.



Quelle: Eigene Darstellung, KIT-ITC.

6.1.3 Technische Beurteilung von Prozessketten und Verwertungskapazitäten

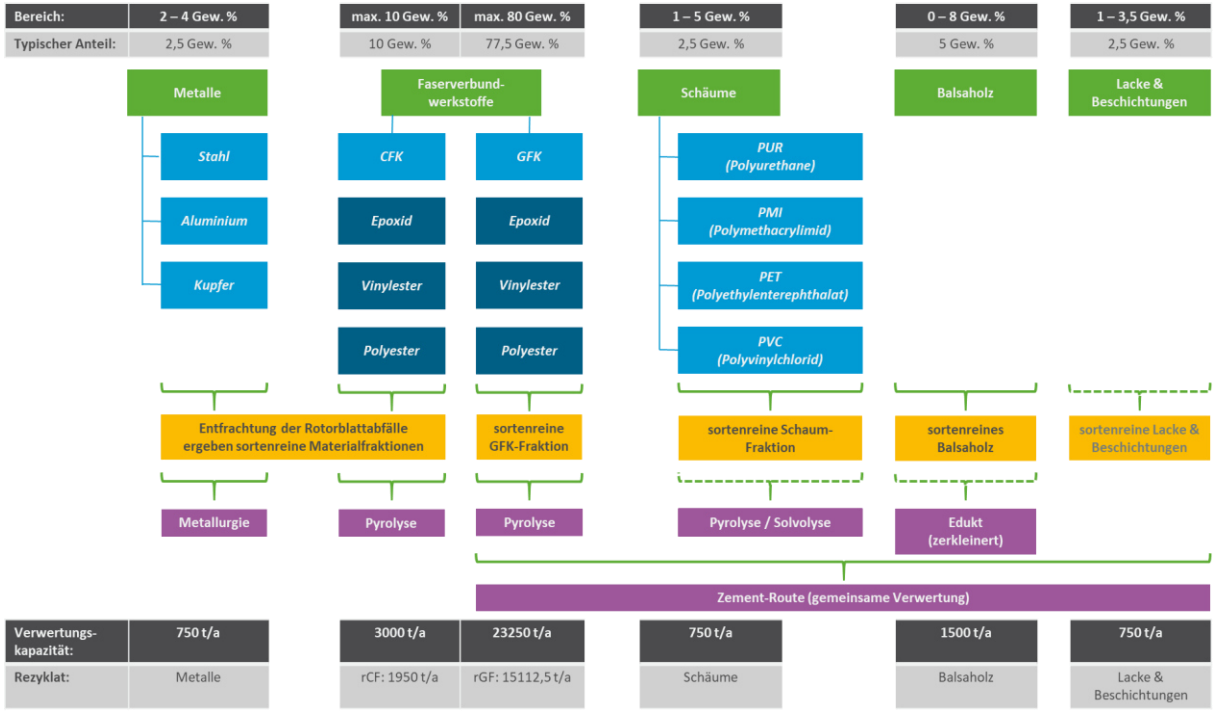
Bezüglich der Verwertung aufbereiteter Rotorblattabfälle ist für einige Materialien nicht ein einzelner Prozessschritt ausreichend, sondern bedingt eine aufeinander abgestimmte Prozesskette, die auch die verwertungsspezifische Aufbereitung beinhaltet. Bezüglich der Bewertung solcher Prozessketten ist der technische Reifegrad, die kommerzielle Verfügbarkeit und vorhandene Verwertungskapazitäten für jeden einzelnen Prozessschritt zu berücksichtigen. Die notwendige Verwertungskapazität ergibt sich maßgeblich aus dem Abfallaufkommen und der Zusammensetzung des zu verwertenden Abfallstroms, was in Abbildung 139 für Rotorblattabfälle dargestellt ist. Die Abbildung zeigt im oberen Bereich die in Rotorblättern eingesetzten Materialien und deren Massenanteile (Albers et al. 2021a). Im mittleren Bereich der Abbildung sind für sortenrein aufbereitete Materialfraktionen mögliche Verwertungsprozesse dargestellt. Allgemein lassen sich Metalle und CFK-Bauteile (Gurte) sortenrein abtrennen und beispielhaft dem genannten Recyclingprozess zuführen. Wie in Kapitel 5 ausgeführt, ist eine sortenreine Aufbereitung einiger Rotorblatt-Materialien schwierig,

wie beispielsweise für GFK, Schäume und Balsaholz. Lacke und Beschichtungen sind allgemein nicht vom GFK trennbar und sind gemeinsam mit dem GFK zu verwerten. Eine Verwertung des Materialmixes, bestehend aus GFK, Schäume, Balsaholz, Lacke und Beschichtungen, ist über die Zementroute möglich.

Im unteren Bereich der Abbildung sind für ein mittleres Rotorblattabfallaufkommen von 30.000 t/a die notwendigen materialspezifischen Verwertungskapazitäten angegeben. Für die GFK-Verwertung wird mit Abstand die höchste Verwertungskapazität mit etwa 23.000 t/a benötigt. Aber auch für CFK ist eine relativ hohe Verwertungskapazität von etwa 3.000 t/a vonnöten.

Zur Bestimmung der Rezyklatmengen beim Recycling der FVW wird ein Faserfüllungsgrad von 65 % angesetzt, was eine Menge an rCF von etwa 2.000 t/a ergibt.

Abbildung 139: Übersicht zu in Rotorblättern verbauten Materialien, deren Massenanteile (Albers et al. 2021a) und daraus bestimmte Verwertungskapazitäten.



Quelle: Eigene Darstellung, KIT-ITC.

6.2 Technische Beschreibung von Verwertungsprozessen

Im Folgenden wird der Wissenstand zu Prozessen der Verwertung aufbereiteter Rotorblattabfälle beschrieben und anhand der in Kapitel 6.1 erläuterten Kriterien technisch beurteilt. Weiterhin werden Abschätzungen zu notwendigen Aufbereitungsschritten sowie der potentiellen Entstehung, bzw. Freisetzung kritischer Stoffe getroffen.

Wie in Kapitel 6.2.1 beschrieben, erfolgen die nachfolgenden Untersuchungen und die Bewertung geeigneter Verwertungsprozesse gegliedert nach den in Rotorblättern enthalten Materialien, wobei es sich im Wesentlichen um faserverstärkte Kunststoffe, hierbei insbesondere GFK, handelt. Deren Anteil kann je nach Rotorblatt einen Anteil bis zu 80 Gew.-% ausmachen. Der Faserfüllungsgrad von GFK kann Werte bis zu 60 Ma.-% erreichen, sodass Glasfasern mengenmäßig dem Hauptmaterial eines Rotorblatts entspricht (Albers et al. 2021a).

Neue Hochleistungs-Rotorblätter sind auf deren Innenseite mit sogenannten CFK-Gurten ausgerüstet, und im Fußpunkt des Rotorblatts können sich CFK-Verstärkungen befinden, die teils als hybride Strukturen ausgeführt sind. Es kann davon ausgegangen werden, dass solche hybriden Strukturen künftig verstärkt zum Einsatz kommen, die schwierig zu verwerten sind.

Für den CFK-Anteil in Rotorblättern liegen unterschiedliche Angaben vor, wobei in Kapitel 2 ein Anteil von 3,3 % Gew-% für ein Rotorblatt von 40 m Länge genannt wird. Eine solche Rotorblattlänge kann einer WEA mit einer Leistung im Bereich von 2 MW zugeordnet werden, wobei neue WEA weitaus höhere Leistungen besitzen, sodass mit einem deutlich höheren CFK-Anteil gerechnet werden muss, der künftig bis zu 10 Gew.-% betragen kann (Albers et al. 2021a).

Weiterhin sind im Rotorblatt Eisen- und Nichteisenmetalle, verschiedene Schäume, Balsaholz, Klebstoffe sowie Lacke und Beschichtungen enthalten, die bezüglich deren Verwertung nachfolgend materialspezifisch dargestellt werden.

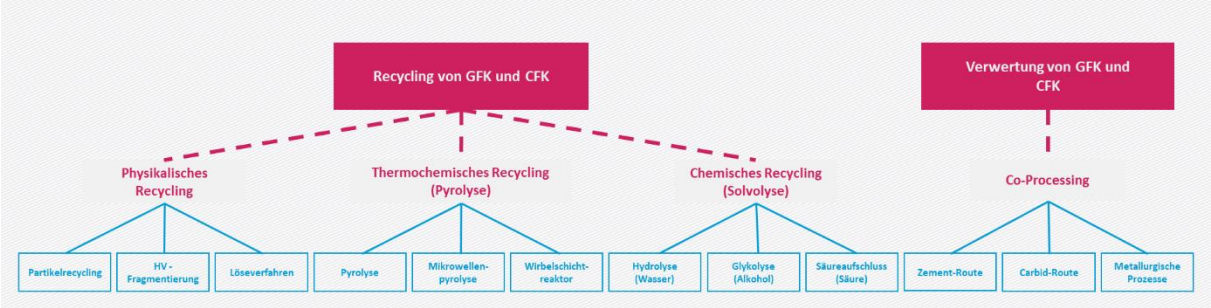
6.2.1 Verwertung von Faserverbundwerkstoffen

Der Begriff Verbundwerkstoff (eng. Composite) bezeichnet einen Werkstoff, der aus mindestens zwei verschiedenen Komponenten besteht, wobei eine als Verstärkungsmaterial und die andere als Matrixwerkstoff dient. Dabei umfasst der Begriff Verbundwerkstoff eine Vielzahl verschiedener Systeme, unter anderem auch Stahlbeton. Liegt das Verstärkungsmaterial faserförmig vor, so spricht man allgemein von einem Faserverbundwerkstoff (FVW), wobei neben einer Vielzahl möglicher natürlicher und synthetischer Fasern auch unterschiedlichste Matrixwerkstoffe zum Einsatz kommen können. Bei FVW sind Kunststoffe mengenmäßig das am häufigsten eingesetzte Matrixmaterial, wobei zwischen einer duroplastischen und einer thermoplastischen Matrix (Sauer et al. 2018) unterschieden wird.

Eine Übersicht und Informationen zur Marktsituation, aktuellen und zukünftigen Abfallmengen sowie der aktuellen deutschen Entsorgungssituation für GFK und CFK fasst der von der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) in 2019 veröffentlichte Bericht „Entsorgung faserhaltiger Abfälle“ zusammen, und gibt darüber hinaus Empfehlungen zum Umgang mit diesen Materialien sowie zum notwendigen Forschungsbedarf (Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) 2019).

Verfahren zur Verwertung von FVW sind in Prozesse des Recyclings und Prozesse der sonstigen Verwertung zu untergliedern. Bei den Recyclingprozessen wird entsprechend der Beanspruchungsart in physikalische, thermochemische und chemische Prozesse unterschieden, die sich bezüglich deren technischen Reifegrad für GFK bzw. CFK unterscheiden können.

Abbildung 140: Übersicht zu Verfahren des Recyclings und der sonstigen Verwertung von faserverstärkten Kunststoffen.



Quelle: Eigene Darstellung, KIT-ITC.

Wie in Kapitel 6.1 zu den Bewertungskriterien bezüglich des technischen Reifegrads dargelegt, werden nachfolgend nur solche Verwertungsprozesse detaillierter beschrieben, deren TRL ≥ 6 ist. Prozesse mit TRL < 6 werden entsprechend den in der Literatur verfügbaren Daten beschrieben, deren Entwicklungsstand dargelegt, und ein möglicher Forschungsbedarf aufgezeigt.

Bei den physikalischen Verwertungsprozessen kann es sich bezüglich FVW um eine mechanische Zerkleinerung zur Gewinnung von Füllstoffersatzmaterialien oder um einen lösemittelbasierten Prozess handeln. Bei einer mechanischen Verwertung muss der FVW meist mehrstufig zerkleinert und nachfolgend in eine faserreiche und eine matrixreiche Fraktion getrennt werden. Die faserreiche Fraktion, wie Fasermehle mit Faserlängen < 0,5 mm oder Kurzfasern mit Faserlängen > 0,5 mm, werden üblicherweise als Füllstoff in Spritzgussanwendungen eingesetzt (Lengsfeld et al. 2019). Weiterhin finden zerkleinerte bzw. gemahlene Carbonfasern (CF) Einsatz in thermoplastischen Kunststoffen, teils als antistatisches Additiv, wo sie teils bisher dafür verwendetes Carbon Black oder Carbon nanotubes (CNT) substituieren können.

Thermische Prozesse können nach der späteren Verwendung der recycelten Fasern oder Nutzung des Fasermaterials unterteilt werden. Dies sind Recyclingprozesse mit dem Ziel einer Faserrückgewinnung (u. a. Pyrolyse, Wirbelschicht), Prozesse, in denen die Fasern einen Rohstoff ersetzen, wie dem Einsatz von GFK bei der Zementklinkerherstellung, oder solche Prozesse, in denen eine rein energetische Verwertung des Materials als Ersatzbrennstoff vorgesehen ist.

Bei den chemischen Prozessen handelt es sich allgemein um die Solvolyse, bei der die Kunststoffmatrix mittels eines Lösemittels zersetzt wird. Bei diesem Prozess ist die Auswahl des Lösemittels, aber auch die Wahl der geeigneten Betriebsbedingungen maßgeblich abhängig von der chemischen Zusammensetzung des Matrixmaterials, wobei ein Angriff des Fasermaterials durch das Lösemittel unterbunden werden muss.

Eine Besonderheit bezüglich der Verwertungsverfahren stellt die elektrodynamische Fragmentierung (EDF) dar, die in der Literatur bei prozessvergleichenden Betrachtungen als eigenständiges Verfahren dargestellt wird. Dieses Verfahren beruht auf der Einleitung eines Hochspannungsüberschlags in einen Reaktor, in dem sich das zu fragmentierende Material in einer dielektrischen Flüssigkeit befindet (Pestalozzi 2020). Dieser Prozess wird in der Literatur unter verschiedenen Bezeichnungen geführt, wie *high-voltage fragmentation* (HVF) oder Fragmentierung mittels Hochspannungsentladung (HSE). Wirklich zu unterscheiden sind hierbei die elektrodynamische (EDF) von der elektrohydraulischen Fragmentierung (EHF), wo bei EDF

der Spannungsdurchschlag in dem zu fragmentierenden Material und bei EHF in der dielektrischen Flüssigkeit erfolgt.

Nachfolgend werden relevante Prozesse zur Verwertung von FVW vorgestellt, die allgemein sowohl für eine GFK-, als auch eine CFK-Verwertung anwendbar sind. In Kapitel 6.3 wird die materialspezifische Verwertung von GFK und in Kapitel 6.4 für CFK dargestellt.

6.2.1.1 Mechanische Zerkleinerung (Partikelrecycling)

Rotorblätter im unteren bzw. mittleren Leistungsbereich von WEA bestehen noch weitgehend aus GFK, ohne CFK-Anteile. Eine direkte mechanische Verwertung solcher Rotorblätter ist mittels einer mehrstufigen Zerkleinerung möglich und wurde in der Vergangenheit zum Beispiel von der Firma ERCOM realisiert (siehe Kapitel 6.3.1.1). Allgemein erfolgt hierbei zunächst eine Zerkleinerung der Rotorblätter vor Ort in transportfähige Längen (Albers et al. 2021a), die zum Beispiel in Abrollcontainern zu einem lokalen Aufbereiter transportiert werden. Dort werden diese vorzerkleinerten Rotorblätter weiter aufbereitet, was auch die Metallabtrennung beinhaltet. Wird eine mechanische Aufbereitung von Rotorblattabfällen zur Erzeugung eines faserförmigen Füllstoffmaterials angestrebt, wie beim ERCOM-Prozess realisiert, so benötigt dies eine mechanische Aufbereitung bis zu einer reinen GF-Fraktion. Als Ausgangsmaterial wird hierzu eine sortenreine GFK-Fraktion benötigt, die zunächst in einem Schredder grobzerkleinert und nachfolgend in geeigneten Mühlen fein aufgemahlen wird, um eine faserreiche Fraktion als faserförmigen Füllstoff zu erzielen, wobei sich in der partikelförmigen Fraktion das Matrixmaterial anreichert.

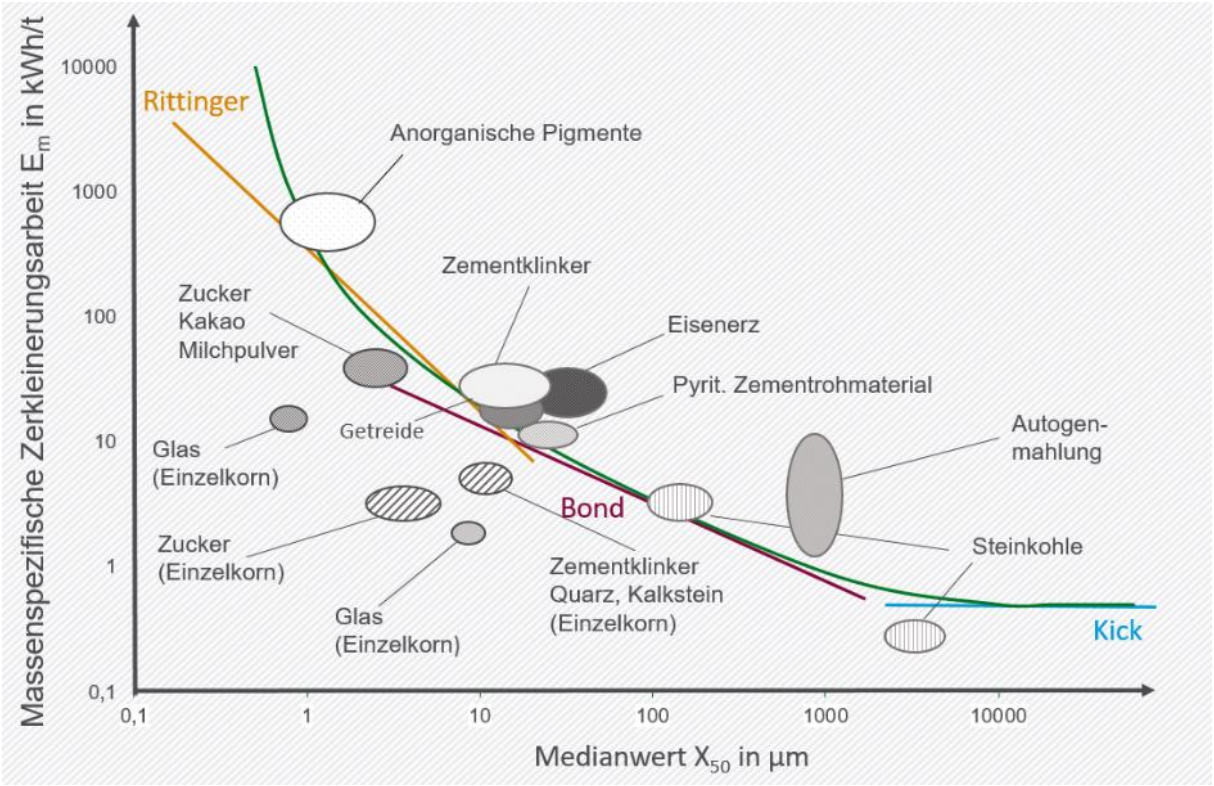
Allgemein ist der spezifische Energiebedarf eines solchen mehrstufigen mechanischen Prozesses wesentlich geringer als derjenige eines chemischen oder thermochemischen Verwertungsprozesses. Die spezifische Zerkleinerungsarbeit für unterschiedliche Materialien gibt Auskunft mit welchem Energieaufwand gerechnet werden kann. Bei einer rein mechanischen Verwertung durch Zerkleinerung wird die Erzeugung einer faserförmigen Fraktion angestrebt, die als Verstärkungsfasern beispielsweise in Sheet Molding Compound (SMC) und Bulk Molding Compound (BMC) eingesetzt werden können.

Entsprechend dem doppellogarithmischen Zerkleinerungs-Diagramm nach Rumpf (1975), das die spezifische Zerkleinerungsenergie über der mittleren Partikelgröße darstellt, muss für eine Feinzerkleinerung eines sprödbrüchigen Materials eine Zerkleinerungsenergie von etwa 0,036 MJ/kg aufgewendet werden (Abbildung 141). Im Zerkleinerungs-Diagramm lassen sich die Kurve annähernd über die Zerkleinerungsgleichungen von Kick für die Grobzerkleinerung bei Partikelgrößen größer 50 mm, nach Bond für den mittleren Partikelgrößenbereich zwischen 0,05 bis 50 mm, und nach Rittinger für die Feinstzerkleinerung bei Partikelgrößen kleiner 50 µm abbilden.

Bezüglich der rein mechanischen Aufbereitung von FVW, die als Füllstoff verwertet werden sollen, wird eine Partikelgröße im Bereich von 100 µm benötigt, um eine saubere Trennung der Fasern von der Matrix zu erzielen, was dann die Abtrennung einer faserreichen Fraktion ermöglicht. Unter dieser Bedingung wird allgemein eine dreistufige Zerkleinerung der Rotorblattabfälle notwendig, da etwa 6 Dekaden auf der logarithmischen Größenskala zu überwinden sind, was sich wie folgt gestaltet kann und pro Zerkleinerungsstufe jeweils eine Reduzierung um etwa zwei Größendekaden erfolgt:

- Stufe 1: Zerteilung des Rotorblatts auf Längen von etwa einem Meter
- Stufe 2: Grobzerkleinerung der Abfälle im Schredder bis auf einige Zentimeter
- Stufe 3: Feinzerkleinerung bis in den Bereich von 100 µm.

Abbildung 141: Massenspezifischer Energiebedarf bei der mechanischen Zerkleinerung in Abhängigkeit der Produktkorngröße.



Quelle: Eigene Darstellung, KIT-ITC, nach TU Bergakademie Freiberg (2021c).

6.2.1.2 Fragmentierung mittels Hochspannungsentladung

Die physikalische Grundlage zur Fragmentierung mittels Hochspannungsentladung bedingt allgemein ein Arbeitsmedium, in dem sich das zu fragmentierende Material befindet, wobei es sich hierbei meist um Wasser handelt. Dabei wird zwischen der sogenannten elektrodynamischen Fragmentierung (EDF), bei dem der Hochspannungsdurchschlag im zu fragmentierenden Material erfolgt, und der elektrohydraulischen Fragmentierung (EHF), bei der der Durchschlag im Arbeitsmedium stattfindet, unterschieden. Hierbei entstehen im Entladungskanal thermische Expansionen von bis 10^4 K, die zu Druckschwankungen von bis 10^{10} Pa führen und eine Fragmentierung bewirken.

EHF arbeitet hierbei mit geringeren Spannungen im Bereich von 30 bis 50 kV und längeren Pulsanstiegszeiten von 0,5 bis 2 ms, was Durchschläge im Arbeitsmedium bewirkt, wodurch Druckschwankungen im Arbeitsmedium entstehen, die auf die Probenoberfläche auftreffen.

Bei EDF liegen höhere Spannungen zwischen 90 und 200 kV vor, mit kürzeren Pulsanstiegszeiten im Bereich von 150 bis 200 ns, die einen Hochspannungsdurchschlag durch den Festkörper bewirken. Dabei können dünne Plasmakanäle mit hoher Energiedichte entstehen, die Energien von 10 bis 100 J/cm in Mikrosekunden deponieren, wodurch der ursprünglich nur 10 bis 50 µm breite Kanal expandiert und Stoßwellen ins umgebende Material freisetzt.

Durch diese Stoßwellen und durch radial propagierende Risse können insbesondere VerbundMaterialien an deren Grenzflächen aufgetrennt werden. Damit beim EDF-Prozess die Hochspannungsentladungen durch den Festkörper erfolgt, muss dieser von einer dielektrischen Flüssigkeit mit einer höheren Durchschlagsfeldstärke umgeben sein. Für steile Spannungsanstiege ist eine geeignete Flüssigkeit notwendig. Hierzu eignet sich Wasser, dessen

Durchschlagsfeldstärke unter diesen Bedingungen größer ist als diejenige der meisten Festkörper. Der selektive Angriff an Grenzflächen, Korngrenzen und Inhomogenitäten bildet die Grundlage für zahlreiche Anwendungen der elektrodynamischen Fragmentierung.

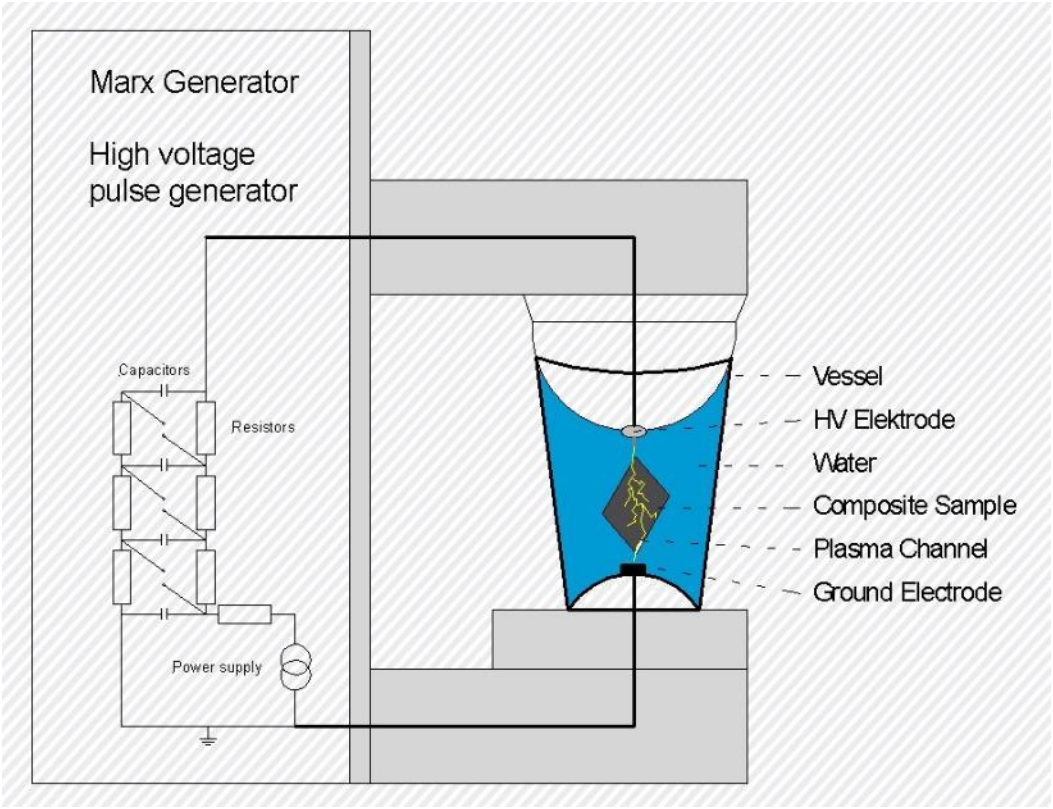
Die Technologie wurde langjährig am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) unter der Bezeichnung FRANKA zunächst für das Recycling von Beton, oder die Metallabtrennung und Schwermetallimmobilisierung von MVA-Schlacken entwickelt und untersucht. Entwickelt wurden am KIT diverse FRANKA-Anlagen für Materialdurchsätze bis zu 1 t/h (KIT - IHM 2010). Die EDF-Technologie wird in den letzten Jahren verstärkt auch für die Fragmentierung von FVW untersucht, wo die Rissbildung an deren Grenzflächen eingeleitet wird.

Die Hochspannungs-Fragmentierung (HSE) wurde ursprünglich in den 1960er Jahren von der Tomsk Polytechnic University in Russland entwickelt, um Gestein aufzubrechen und hochwertige Mineralien und Kristalle herauszutrennen (Mativenga et al. 2016; Roux et al. 2017). Auf der Suche nach geeigneten Recyclingverfahren für Verbundwerkstoffe hat sich diese Technologie als eine vielversprechende Methode herausgestellt, da deren Vorteil ideal für die Fragmentierung von Verbundwerkstoffen angewandt werden kann, wo die Rissbildung an deren Grenzflächen ansetzt und das zu recycelnde Fasermaterial hierdurch geringer angriffen werden soll als bei anderen Verwertungsprozessen. Die Materialkennwerte sollen weitgehend erhalten bleiben, was eine hochwertigere Verwertung, zum Beispiel zur Gewinnung von rCF aus CFK ermöglicht und ein Downcycling vermeidet (Weh 2015a).

Bei EDF werden Spannungen bis 200 kV bei kurzen Pulszeiten über eine Elektrode in das System eingeleitet, wodurch lokal hohe Drücke entstehen, die innere mechanische Spannungen induzieren und dazu führen, dass das Material fragmentiert (Mativenga et al. 2016; Roux et al. 2013; Gopalraj und Kärki 2020). Die über eine Elektrode in die Flüssigkeit eingeleiteten Hochspannungspulse werden mit einem Marx-Generator erzeugt und das zu fragmentierende Material befindet sich zwischen den Elektroden (Abbildung 142), umgeben von einer dielektrischen Flüssigkeit, meist Wasser, in einem Reaktionsgefäß (Roux et al. 2017, S. 385; Weh 2015a).

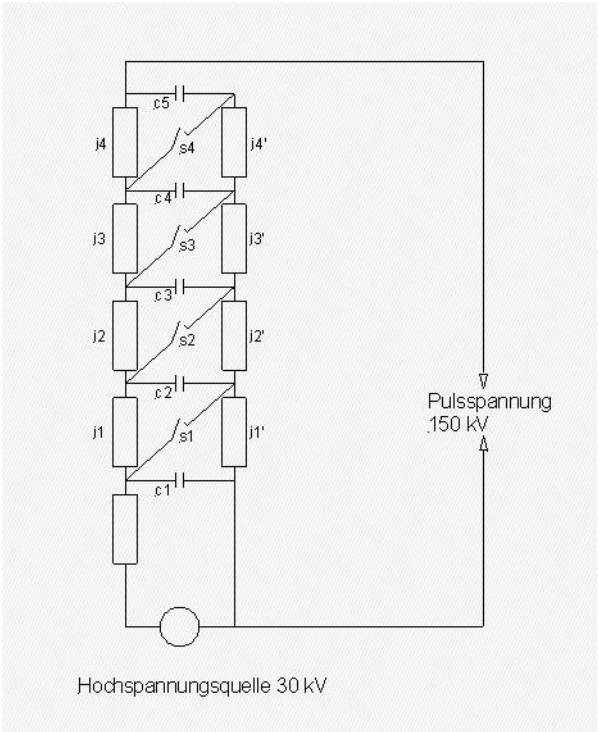
Das Prinzip des Marxgenerators zur Hochspannungserzeugung besteht aus mehreren Kondensatoren, die für die Aufladung parallelgeschaltet sind, für die Entladung dagegen in Reihe geschaltet, sodass sich deren Spannungen addieren. Beispielhaft ist in Abbildung 143 ein fünfstufiger Marxgenerator dargestellt, wobei die Kondensatoren über Isolationselemente auf eine Spannung von etwa 30 kV aufgeladen werden. Sind die Schalter nach der Aufladung geschlossen, so addieren sich die Spannungen der Kondensatoren, in diesem Beispiel zu einer Ausgangsspannung von 150 kV. Die Parallelschaltung der Kondensatoren über die Isolationselemente hat während der kurzen Pulsdauer keinen Einfluss auf die Funktion des Marxgenerators. Die in Abbildung 143 ersichtlichen Schalter sind meist als selbstschaltende Funkenstrecken ausgeführt, wobei eine Funkenstrecke extern getriggert ist und die anderen in Folge der entstehenden Überspannung selbst durchschalten (Rapp Instruments 2008).

Abbildung 142: Schematischer Versuchsaufbau zur elektrodynamischen Fragmentierung.



Quelle: Eigene Darstellung, KIT-ITC, nach Roux et al. (2017).

Abbildung 143: Schematische Darstellung eines 5-stufigen Marx-Generators.



Quelle: Eigene Darstellung, KIT-ITC, nach Rapp Instruments (2008).

6.2.1.3 Löseverfahren

Lösungsmittelbasierte Prozesse zum Kunststoffrecycling werden seit über 20 Jahren entwickelt, sind aber bislang noch kaum am Markt etabliert. Hierbei handelt es sich um ein physikalisches Verfahren, bei der die Polymere den Aggregatzustand ändern, aber das Polymer selbst als solches unverändert erhalten bleibt. In Deutschland gibt es hierzu den CreaSolv-Prozess, der in Kooperation von Fraunhofer IVV und der CreaCycle GmbH entwickelt wurde. Ein ähnliches Verfahren bietet die APK GmbH in Merseburg unter dem Namen „Newcycling“ als lösungsmittelbasierter Recyclingprozess für Polyethylen (PE) und Polyamid (PA) an. Mit diesem Prozess können auch Verbundmaterialien aus Verpackungsabfällen in derer komplexen Verbundstruktur wie Multilayerfolien oder Getränkekartons aufbereitet werden, was in einer Anlage mit einer Kapazität von 10.000 t/a stattfindet. Fraunhofer IVV gibt an, den CreaSolv-Prozess auch für die Aufbereitung duroplastischer FVW weiterzuentwickeln (Schlummer 2021).

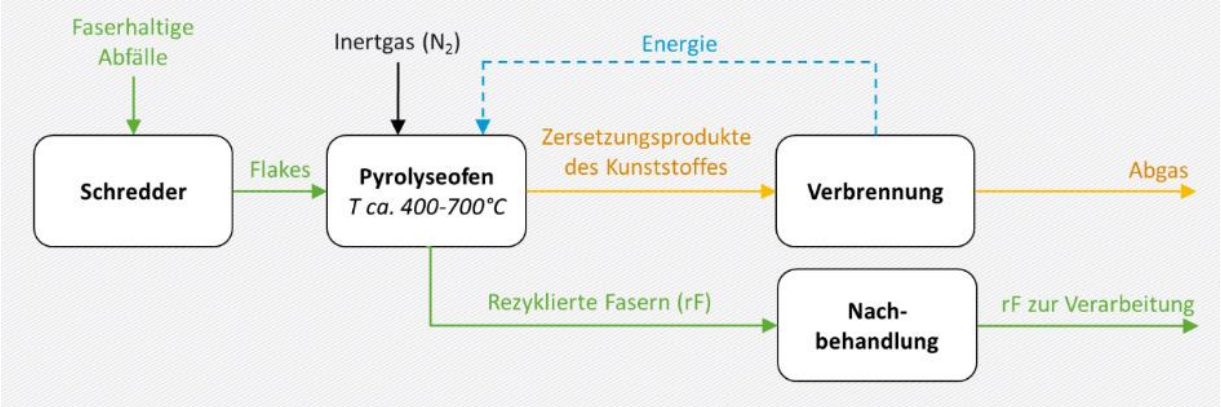
6.2.1.4 Pyrolyse

Unter Pyrolyse wird der thermochemische Umwandlungsprozess von organischen Verbindungen unter Ausschluss von Sauerstoff (λ=0) verstanden, meist in inerter Atmosphäre (z. B. Stickstoff), durch Temperatureinwirkung, wodurch Pyrolysegase, Pyrolyseöle und teils ein fester Rückstand (Pyrolysekoks) entstehen. Die Pyrolyse kann in unterschiedlichen Reaktoren stattfinden, die meist kontinulierlich, aber teils auch diskontinuierlich betrieben werden. Die bekanntesten Pyrolysereaktoren sind:

- Drehrohrreaktor
- Schneckenreaktor
- Wirbelschichtreaktor
- Festbettreaktor.

Aktuell ist die Pyrolyse derzeit der einzige kommerziell eingesetzte Recyclingprozess für FVW, insbesondere für CFK. Bei dem Prozess werden die faserhaltigen Abfälle nach einer Zerkleinerung in inerter Atmosphäre Temperaturen bis zu 700 °C ausgesetzt. Die genauen Pyrolysebedingungen, inklusive Verweilzeit des Materials im Reaktor sowie der tatsächlich benötigten Temperatur, sind v. a. abhängig von der Art und Menge der Kunststoffmatrix. Dabei soll die Matrix zersetzt, aber die Fasern nicht angegriffen werden. Besonders für die Pyrolyse von CFK werden saubere inerte Bedingungen benötigt. Meist wird für eine Reinigung der Fasern von Matrixresten, dem sogenannten Pyrolysekoks, eine Nachbehandlung in sauerstoffhaltiger Atmosphäre notwendig, wobei eine Schädigung der Fasern hierdurch nicht ausgeschlossen werden kann. Zersetzungsprodukte der Matrix sind Pyrolysegase und –öle, deren Anteile und Zusammensetzung von der Art des Matrixmaterials sowie der Prozessführung abhängen. Oft besteht das Pyrolysegas aus den Hauptbestandteilen CO, H_2 und CH_4 sowie längerkettigen Kohlewasserstoffen, aus denen durch eine Abkühlung Pyrolyseöl gewonnen werden kann. Insbesondere die Pyrolysegase werden in den meisten industriell betriebenen Anlagen verbrannt, um mit der dabei freigesetzten Energie den Pyrolyseprozess zu beheizen (Abbildung 144).

Abbildung 144: Schematische Darstellung der Pyrolyse von FVW, inkl. Produktnachbehandlung.



Quelle: Eigene Darstellung, KIT-ITC.

6.2.1.5 Mikrowellen-Pyrolyse

Die Mikrowellen (MW)-Pyrolyse ist ein Ansatz, sowohl die Fasern als auch die Matrix einer stofflichen Verwertung zu unterziehen, wobei der Technologiereifegrad für CFK mit 4 angegeben wird (Bennet 2021) und für GFK Angaben fehlen. Aufgrund identischer Matrixmaterialien kann von einem übertragbaren Reaktionsverhalten ausgegangen werden, wobei sich jedoch die Glas- und Carbonfasern bei der MW-Beheizung unterschiedlich verhalten und somit eine TRL-Übertragung nicht direkt möglich ist.

Die MW-Pyrolyse zählt zu den thermochemischen Verfahren, bei denen durch die Aufheizung des Materials in inerter Atmosphäre, meist Stickstoff, eine thermische Zersetzung der Matrix unter Bildung von Pyrolysegas- und öl sowie fester kohlenstoffhaltiger Materialien erfolgt, die als Pyrolysekoks teils am faserförmigen Material anhaften.

Bei der MW-Pyrolyse erfolgt die Materialerwärmung durch die MW-Strahlung, die insbesondere zur Erwärmung dielektrischer Materialien geeignet ist. MW sind elektromagnetische Wellen im Frequenzbereich von 300 MHz bis 300 GHz, die auch mit erheblich geringerer Leistungsdichte in vielen anderen Anwendungen, wie z. B. Radio-, Fernseh- und Radartechnik, zum Einsatz kommen.

MW können von Materialien absorbiert, transmittiert oder reflektiert werden, wobei alle drei Prozesse zu beachten sind. Die Absorption bewirkt eine Materialerwärmung, wobei die Umwandlung der elektromagnetischen Wellen in Wärmeenergie im wesentlichen von den elektromagnetischen Eigenschaften des zu erwärmenden Materials abhängen, die wiederum von der Prozesstemperatur und der eingesetzten Frequenz abhängig sind.

MW können allgemein von polaren, magnetischen oder schwach elektrisch leitfähigen Materialien im Volumen absorbiert werden, wodurch die Materialerwärmung gleichmäßig und unabhängig von der Wärmeleitfähigkeit erfolgt. MW können teils tief in ein Material eindringen, wodurch die Materialerwärmung über das gesamte Volumen stattfindet. Demgegenüber spielt bei einer konventionellen Aufheiztechnik die Wärmeleitfähigkeit eine Rolle, da die Wärmeenergie über die Oberfläche meist in das Material eingebracht werden muss.

Die molekulare Struktur des Materials hat einen wesentlichen Einfluss auf die Fähigkeit MW zu absorbieren, wobei sich polare Moleküle, die räumlich getrennte Ladungsbereiche besitzen, wie z. B. das Wassermolekül, aber auch Kunstharze, gut mittels MW erwärmen lassen. Hierbei werden die polaren Moleküle durch das hochfrequente MW-Wechselfeld in Schwingung versetzt und das Material durch innere Reibung erwärmt.

Metalle sind elektrisch leitfähig und können MW reflektieren. CFK ist hingegen nur mäßig elektrisch leitfähig, sodass MW absorbiert werden, wobei dies im CFK-Bauteil über eine Bildung von Wirbelströmen erfolgt, die eine ohmsche Erwärmung des Bauteils bewirken (Emmerich und Kuppinger 2014).

Unpolare Stoffe, wie Luft, Teflon oder Quarzglas, nehmen keine MW-Energie auf und sind für MW weitgehend transparent, sodass MW diese nahezu ohne Abschwächung durchdringen können.

MW breiten sich mit Lichtgeschwindigkeit aus, sodass solche Prozesse unmittelbar stattfinden, was sowohl für die Erwärmung, als auch für die Abkühlung gilt.

Die volumetrisch wirkende Erwärmung, beispielsweise von CFK, ist mit der MW-Eindringtiefe in das Material verknüpft und hängt von dessen dielektrischen Eigenschaften bzw. der elektrischen Leitfähigkeit und der MW-Frequenz ab, wobei die Aufheizung leitfähiger Materialien durch eine Anregung verlustbehafteter Wirbelströme erfolgt (Mikrowellen- und Plasmatechnologie 2021).

Die von dielektrischen Materialien aufgenommene MW-Leistung ist vereinfacht linear von der Frequenz und der Dielektrizitätskonstante abhängig sowie quadratisch von der elektrischen Feldstärke (Malte Moeller):

$$P = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \varepsilon_0 \cdot \epsilon'' \cdot E^2$$

und für Materialien oder Materialgemische, die zusätzlich eine elektrische Leitfähigkeit σ aufweisen, gilt (Wikipedia 2021b):

$$P = (\sigma + 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \varepsilon_0 \cdot \epsilon'') \cdot E^2$$

Dabei ist P die aufgenommene Leistung des Materials, f die MW-Frequenz, ε_0 die elektrische Feldkonstante, ε“ der Imaginärteil der komplexen Dielektrizitätskonstante, E die elektrische Feldstärke und σ die elektrische Materialleitfähigkeit.

Bei der volumetrisch wirkenden MW-Erwärmung wird das Material einer gleichmäßigen Energiezufuhr ausgesetzt, vorausgesetzt das Material ist dünn genug im Vergleich zur MW-Eindringtiefe. Dies bewirkt eine gleichmäßige Temperaturverteilung über den Materialquerschnitt. Da die Oberfläche des Materials im Kontakt mit der Umgebung steht, die meist mittels MW nicht aufgeheizt wird, kann im Materialinneren bei einer MW-Erwärmung eine höhere Temperatur als an der Materialoberfläche vorliegen. Dies ist vorteilhaft für diverse MW-Anwendungen, da eine homogene und schonende thermische Belastung des Materials vorliegt.

In der industriellen MW-Technik werden häufig metallische Kammern eingesetzt, die MW reflektieren, wobei neben einer Kammerbauform auch Banddurchlaufanlagen sowie eine Vielzahl an Sonderbauformen für spezielle Anwendungen eingesetzt werden können (Bauer 2012).

MW-Kammeranlagen sind weitgehend wie MW-Haushaltgeräte aufgebaut, wo mehrere Magnetrone angeordnet sein können, um eine möglichst homogene Feldverteilung zu erzielen, was eine gleichmäßige Erwärmung gewährleistet. Spezielle Ausführungen solcher Anlagen werden zum Beispiel für die Erwärmung großer Bauteile eingesetzt, um kürzere Verarbeitungszeiten und verbesserte Produkteigenschaften zu realisieren, wie beispielsweise für die Aushärtung von FVW, insbesondere von CFK-Bauteilen (Feher und Thumm 2004).

Die MW-Erzeugung erfolgt maßgeblich mittels Magnetrone, die mit unterschiedlichen Frequenzen arbeiten können. MW-Haushaltsgeräte arbeiten ausschließlich mit 2,45 GHz

Magnetrone, die sehr kostengünstig sind. Für technische Anwendungen werden auch Magnetrone mit 915 MHz und 5,8 GHz kommerziell eingesetzt, deren Preise jedoch deutlich über denen mit 2,45 GHz liegen.

Für die industrielle Behandlung diverser Materialien sind MW-Bandanlagen entwickelt worden, die meist aus einer rohrförmigen Reaktionszone aus Aluminium, Edelstahl oder Quarzglas bestehen und daran spiralförmig Magnetrone installiert sind, was eine gleichmäßige und homogene Temperaturverteilung gewährleistet. Das Material wird hierbei auf ein mikrowellentransparentes Band aufgebracht und durch die Anlage transportiert, sodass es von allen Seiten erwärmt werden kann. Am Ein- und Ausgang der Anlage sind sogenannte Absorbertunnel notwendig, die einen Austritt der MW-Strahlung unterbinden. Solche Anlagen sind für die Erwärmung unterschiedlichster Produkte Stand der Technik. Solche Anlagen sollten mit einem nicht zu großen Aufwand an andere Prozesse, bzw. Materialien adaptierbar sein. Abbildung 145 zeigt hierzu zwei Mikrowellen-Bandanlagen der Firma Linn High Therm GmbH, bei denen die an den rohrförmigen Reaktoren installierte Magnetrone sowie die Bandanlage für den Materialtransport (Bauer 2012) erkennbar sind. Bei der rechten Anlage in Abbildung 145 handelt es sich um eine Entwicklung der Firma Linn High Therm GmbH, die für die MW-Pyrolyse von FVW entwickelt wurde. Solche MW Bandanlagen sind kommerziell schon mit Reaktionszonen bis 16,3 m und einer Bandbreite von 1 m erhältlich, was einen Materialdurchsatz von bis zu 3000 kg/h ermöglicht (Imenokhoyev et al. 2012).

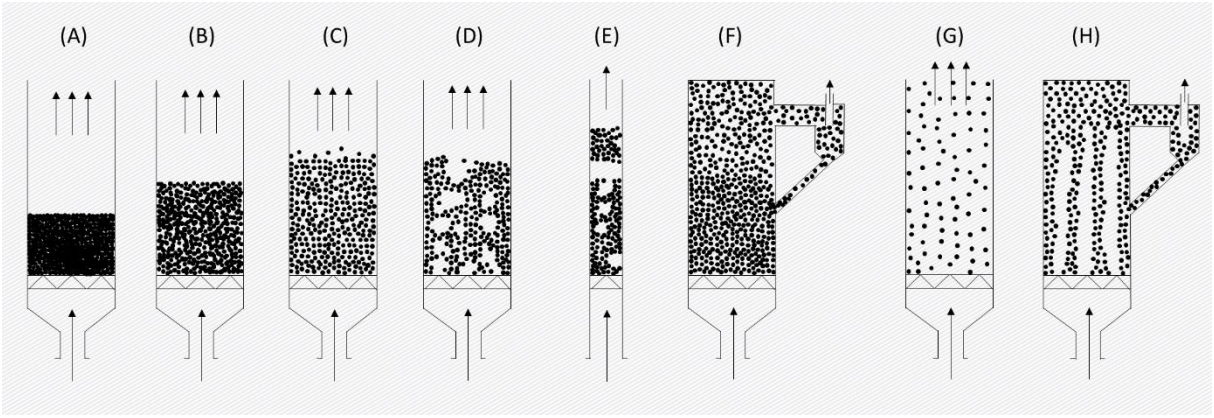
Abbildung 145: Mikrowellen-Bandanlagen der Firma Linn High Therm GmbH.

Quelle: Linn High Therm GmbH, Erlaubnis zur Nutzung der Grafik liegt vor.

6.2.1.6 Wirbelschichtverfahren

Feststoffschüttungen können durch eine aufwärtsgerichtete Strömung durch ein Fluid fluidisiert werden, was als Wirbelschichten (WS) bezeichnet wird. Dabei kann der Feststoff dem Reaktor kontinuierlich oder diskontinuierlich zuführt werden. Eingesetzt werden WS u. a. zur Materialtrocknung oder in der Verbrennungstechnik (z. B. Klärschlammverbrennung). Je nach Betriebsart können sich verschiedene WS-Zustände ausbilden (Abbildung 146). Dabei beschreibt (A) ein durchströmtes Festbett, bei dem noch kein WS-Zustand vorliegt, (B) zeigt eine beginnende WS mit einer Minimalfluidisierung, (C) zeigt eine homogene WS, (D) und (E) beschreiben eine blasenbildende, bzw. stoßende WS. (F) zeigt eine zirkulierende WS, (G) einen pneumatischen Stofftransport und (H) eine gassenbildende WS.

Abbildung 146: Verschiedene Betriebszustände einer Wirbelschicht.

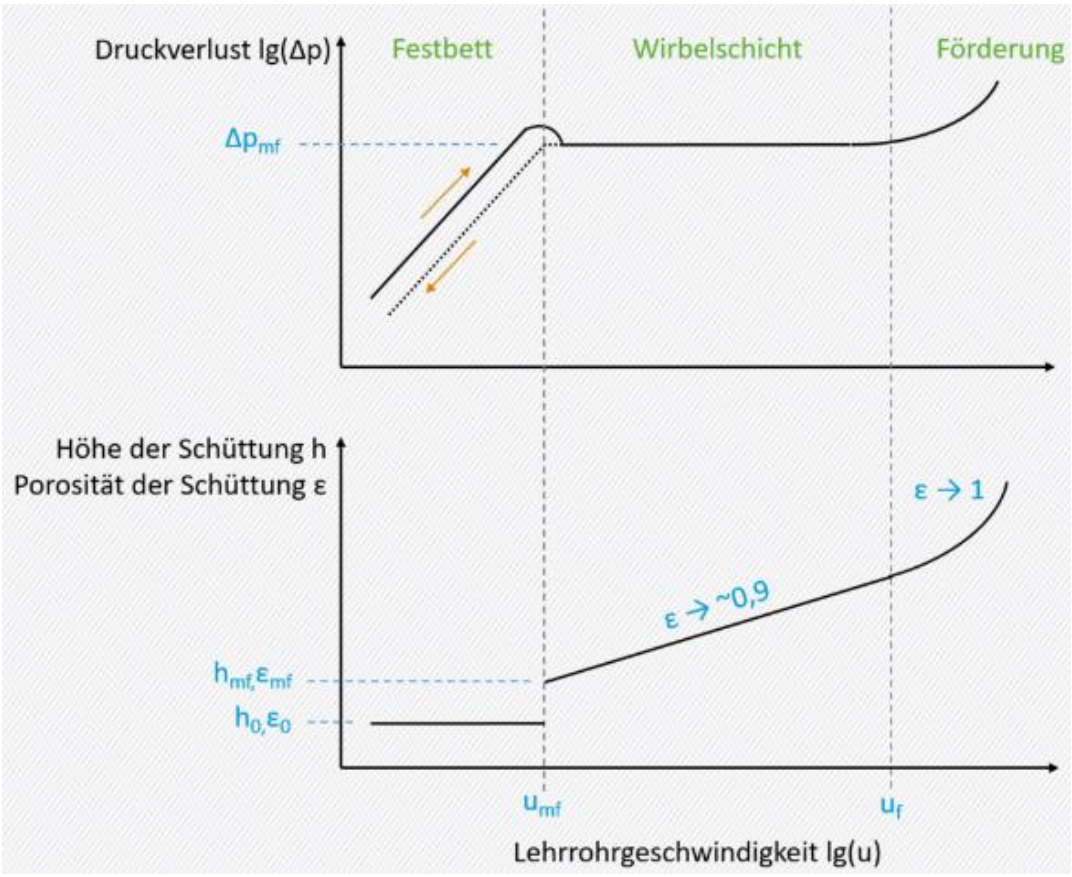


Quelle: Eigene Darstellung, KIT-ITC, nach Posselt (2019).

Charakteristisch zur Beschreibung der verschiedenen WS-Zustände ist die Porosität der Schüttung ε sowie die Höhe der Schüttung h. Die jeweiligen Indices geben Auskunft über das Vorliegen eines Festbettes (0), den Lockerungspunkt (mf) sowie einer WS.

Die Bildung einer WS geht von einem Festbett mit der Höhe h_o und Porosität ε_o aus, das von einem Fluid mit der Geschwindigkeit u durchströmt wird (Abbildung 147).

Abbildung 147: Druckverlust Δp sowie Höhe h und Porosität ε einer Schüttschicht in Abhängigkeit der Strömungsgeschwindigkeit.



Quelle: Eigene Darstellung, KIT-ITC.

Dabei stellt sich eine Druckdifferenz Δp ein, die gemäß den Gesetzen für durchströmte Packungen mit u ansteigt. Eine Methode zur Berechnung des Druckverlusts ist die Ergun-Gleichung:

$$\frac{\Delta p_{FB}}{h} = 150 \cdot \frac{1}{(\varphi \cdot d_P)^2} \cdot \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \cdot \mu_F \cdot u + 1{,}75 \cdot \frac{1}{(\varphi \cdot d_P)} \cdot \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3} \cdot \rho_F \cdot u^2$$

mit:

Δp_{FB} Druckverlust im Festbett in Pa

h Höhe der Schüttung in m

φ Kugelförmigkeit

d_P Partikeldurchmesser in 1/m

ε Porosität der Schüttung

μ_F Dynamische Viskosität des Fluids on Pa*s

u Leerrohrgeschwindigkeit in m/s

ρ_F Dichte des Fluids in kg/m^3

Diese Gleichung ist gültig für $1 < Re_P < 4.000$, wobei Re_P definiert ist als:

$$Re_P = \frac{u_A \cdot d_P}{\nu_F}$$

mit:

Re_P Reynoldszahl Partikel

u_A Anströmgeschwindigkeit in m/s

ν_F kinematische Viskosität des Fluids in m^2/s

Ab einer minimalen Fluidisierungsgeschwindigkeit u_{mf} beginnt die Fluidisierung des Bettes am Lockerungspunkt. Hierbei stellt sich sprunghaft eine neue Betthöhe h_{mf} und eine zugehörige Porosität ε_{mf} ein und ab diesem Punkt wird das Bett von der Strömung getragen:

$$\Delta p_{WS} = (1-\varepsilon) \cdot (\rho_P - \rho_F) \cdot g \cdot h$$

mit:

Δp_{WSB} Druckverlust in der Wirbelschicht in Pa

ρ_P Dichte des Feststoffs in g/cm^3

g Fallbeschleunigung in m/s^2

Am Lockerungspunkt gilt:

$$\Delta p_{FB} = \Delta p_{WS}$$

Eine kleine Überhöhung des Druckverlustes am Lockerungspunkt ist auf die Überwindung interpartikulärer Haftkräfte zurückzuführen. Oberhalb des Lockerungspunktes bleibt der Druckabfall trotz Steigerung von u konstant, h und ε hingegen nehmen zu.

Während die expandierende WS bei einer Flüssigkeit homogen bleibt, setzt bei Gasen rasch eine Blasenbildung ein, wobei die Blasengröße nach obenhin zunimmt und bei schlanken Behältern ein Stoßen einsetzen kann.

Da ein Festbett und eine WS am Lockerungspunkt den gleichen Druckverlust aufweisen, können folgende Zusammenhänge ermittelt werden:

Für Re < 1 gilt

$$u_{mf} = \frac{1}{150} \cdot \frac{\varepsilon_{mf}^3}{(1-\varepsilon_{mf})} \cdot \frac{(\rho_P - \rho_F) \cdot g \cdot (\varphi \cdot d_P)^2}{u \cdot \rho_F}$$

.

Für Re > 100 gilt

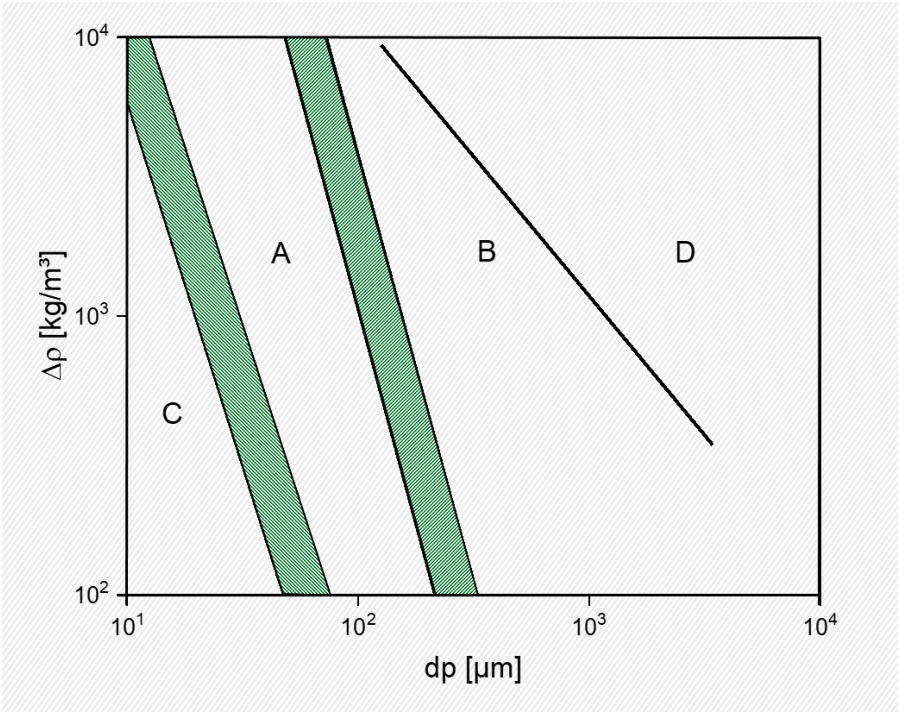
$$u_{mf} = \sqrt{\frac{1}{1{,}75} \cdot \varepsilon_{mf}^3 \cdot \frac{(\rho_P - \rho_F) \cdot g \cdot \varphi \cdot d_P}{\rho_F}}$$

.

Die untere Formel gilt für eine turbulent durchströmte Schüttung.

Zur Bestimmung der Porosität am Lockerungspunkt gibt es kein allgemeingültiges Modell. Daher wird der Zusammenhang zwischen u_{mf} und ε_{mf} experimentell bei Umgebungstemperatur bestimmt, da ε_{mf} solange die Partikeln nicht agglomerieren, nicht wesentlich von der Temperatur abhängt, aber von der Partikelgröße. Typische Werte von ε_{mf} liegen zwischen 0,4 und 0,6. Einen weiteren Einfluss auf die Ausbildung der WS hat das Schüttgut. Nach Geldart lassen sich vier Gruppen in Abhängigkeit des Partikeldurchmessers d_P sowie dem Dichteunterschied zwischen Partikel ρ_P und Fluid ρ_F unterscheiden (Abbildung 148) (Fuchs 2013; Posselt 2019).

Abbildung 148: Einteilung des Schüttguts einer Wirbelschicht nach Geldart.



Quelle: Eigene Darstellung, KIT-ITC, nach Posselt (2019) und Fuchs (2013).

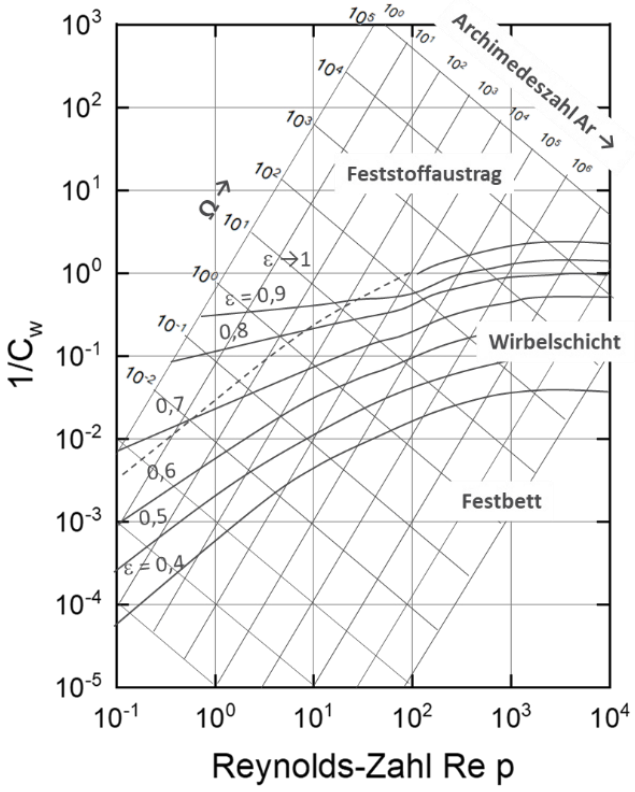
Tabelle 58: Klasseneinteilung des Schüttguts einer Wirbelschicht nach Geldart.

Klasse	Beschreibung und Beispiele
Klasse C „Cohesive“	Feine, kohäsive Partikeln (gemittelter Durchmesser < 20 µm) und geringe Dichte Interpartikuläre Kräfte dominieren, daher Fluidisierung mit Hilfsmitteln (Rührwerke, Vibratoren) nötig Oft Auftreten von Kanalbildung Beispiel: Zement
Klasse A „Aeratable“	Kleine und/oder Partikeln mit geringer Dichte Ausbildung einer homogenen Wirbelschicht ab dem Lockerungspunkt Bei deutlicher Überhöhung der Geschwindigkeit über die Minimalfluidisierung mit einer Blasenbildung verbunden, wobei die Blasengröße begrenzt ist und abnimmt, je kleiner die Partikeln sind. Beispiele: Feinkörnige Braunkohle, Katalysatoren in Crack-Anlagen
Klasse B „Bubbling“	Grobkörnige Partikeln (0,1 bis 1 mm) oder Partikeln mit eher hoher Dichte, gut fluidisierbar Deutliche Blasenbildung nach der Minimalfluidisierung mit großen Blasendurchmessern die nahezu unabhängig von der mittleren Partikelgröße sind Beispiele: Grobkörnige Braunkohle, Sande
Klasse D „Spoutable“	Sehr grobkörnige Partikeln (1 mm) oder Partikeln mit hoher Dichte Schwer fluidisierbar, häufige Kanalbildung oder stoßendes Verhalten nach der Minimalfluidisierung Blasen koaleszieren sehr schnell und wachsen dadurch schnell an Beispiele: Kaffeebohnen, Weizenkörner

Quelle: Fuchs (2013).

Der WS-Zustand in Abhängigkeit von den Partikeln, bzw. dem Wirbelgut und dem Fluid kann mit dem Zustandsdiagramm nach Reh beschrieben und vorhergesagt werden:

Abbildung 149: Zustandsdiagramm nach REH.



Quelle: Eigene Darstellung, KIT-ITC, nach Reh (1962).

Darin ist die Partikel-Reynoldszahl definiert als:

$$Re_P = \frac{u_A \cdot d_P}{\nu_F} = \frac{u_A \cdot d_P \cdot \rho_F}{\eta_F}$$

Die Archimedes-Zahl beschreibt das Verhältnis zwischen Auftriebskraft und Reibungskraft:

$$Ar = \frac{g \cdot (\rho_P - \rho_F) \cdot \rho_F \cdot d_P^3}{\eta_F^2}$$

Die Omega-Zahl wird berechnet nach:

$$\Omega = \frac{\rho_F^2 \cdot u_F^3}{g \cdot (\rho_P - \rho_F) \cdot \eta_F}$$

Der Widerstandsbeiwert verbindet die genannten Größen und wird über die erweiterte Froude-Zahl Fr* bestimmt, wobei Fr das Verhältnis aus Trägheitskräften und Schwerkräften beschreibt:

$$\frac{1}{c_W} = \frac{3}{4} \cdot Fr^* = \frac{3}{4} \cdot \frac{u_F^2}{g \cdot d_P} \cdot \frac{\rho_F}{(\rho_P - \rho_F)} = \frac{3}{4} \cdot \frac{Re_P^2}{Ar} = \frac{3}{4} \cdot \frac{\Omega}{Re_P}$$

Eine WS wird stationär betrieben, wenn folgende beiden Bedingungen eingehalten werden (Strauß 2009):

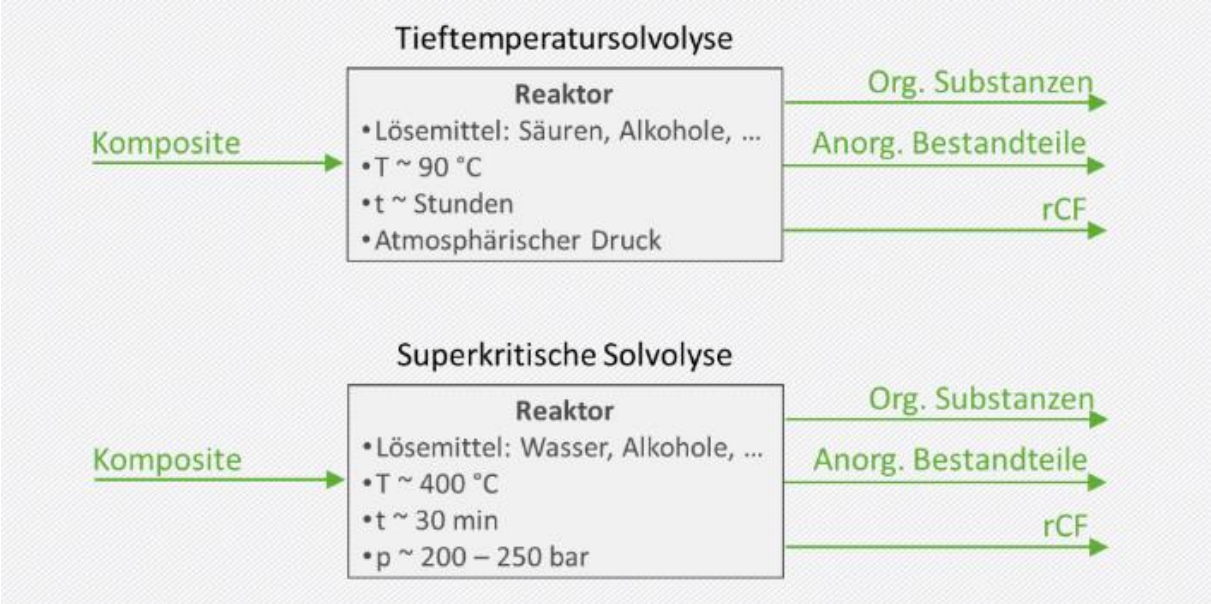
$$50 < Ar < 10.000 \text{ und } 100 < Fr < 5.000.$$

6.2.1.7 Solvolyse

Bei der Solvolyse findet die Reaktion zur Zersetzung der Kunststoffmatrix nicht in einer gasförmigen Atmosphäre, sondern in einem Lösemittel statt. Dabei wird je nach Art des Lösemittels von einer Hydrolyse (Lösemittel Wasser), Alkoholyse (Alkohole) oder Glykolyse (Glykol) gesprochen. Als weitere Lösemittel sind u. a. Säuren, Laugen oder Ammoniak möglich. Die Solvolyse bietet die Möglichkeit, neben den rezyklierten Fasern auch die Zersetzungsprodukte der Kunststoffmatrix zu gewinnen, wozu diese in nachfolgenden Schritten vom Lösemittel getrennt und beispielsweise mittels Polymerisation aufbereitet werden können (Dorigato 2021; Keith et al. 2016).

Bisher ist es nicht gelungen, mittels Solvolyse Fasern mit einer Qualität entsprechend von Neufasern zu gewinnen, und weiterhin kann eine Faserkürzung vorliegen (Dorigato 2021). Zu den wichtigsten Einflussparametern der Solvolyse gehören neben dem Lösemittel der Reaktortyp, die Reaktionszeit, die Temperatur, der Druck, die Anwesenheit eines Katalysators sowie die Art der Atmosphäre (Morin et al. 2012). Je nach Temperatur und Druck wird zwischen Tieftemperatursolvolyse (< 200 °C), Hochtemperatursolvolyse (> 200 °C) und superkritischer Solvolyse (Abbildung 150) unterschieden (Morin et al. 2012; Keith et al. 2016; Krauklis et al. 2021; Oliveux et al. 2015).

Abbildung 150: Schematische Darstellung und wesentliche Parameter der Solvolyse bei tiefen Temperaturen (oben) und unter superkritischen Bedingungen (unten).



Quelle: Eigene Darstellung und Übersetzung, KIT-ITC, nach Morin et al. (2012).

Die Prozessparameter sind weitgehend abhängig vom Lösemittel, wobei überkritische Fluide ein deutlich unterschiedliches Verhalten aufweisen als diese unterhalb des kritischen Punktes sind. Weiterhin weisen sie eine niedrigere Viskosität, einen höheren Stofftransport, höhere Diffusität und ein druckabhängiges Lösungsvermögen auf (Oliveux et al. 2015). Geeignet sind sie wegen einer schnellen und selektiven Depolymerisation zur Verwertung von Verbundwerkstoffen mit Polyurethanen, PEEK, PET, Nylon, Phenol-Harzen, Epoxid-Harzen und Polyethylen als Matrixmaterialien (Morin et al. 2012; Keith et al. 2016).

Durch die extremen Reaktionsbedingungen steigen die Anforderungen an den Reaktor und damit verbunden die Kosten, da nickelreiche Edelstahllegierungen eingesetzt werden müssen, um den hohen Drücken und Temperaturen standzuhalten. Je nach Materialien die verwertet

werden muss der Reaktor zusätzlich korrosionsbeständig sein (Oliveux et al. 2015; Job et al. 2016).

Die Umweltauswirkungen der Solvolyse sind, verglichen mit anderen Recyclingverfahren, wie z. B. der Pyrolyse oder des Recycling mittels Wirbelschichtreaktor, geringer, da weder CO_2 noch andere Treibhausgase erzeugt und emittiert werden (Keith et al. 2016). Ein Nachteil der Solvolyse ist jedoch, dass je nach Anwendung und verwendeten Materialien toxische Lösungsmittel zurückbleiben können, weshalb die Forschung ihren Fokus immer mehr auf die Verwendung von Wasser und Alkoholen bei normalen und superkritischen Bedingungen setzt (Krauklis et al. 2021).

Vorteile der superkritischen Solvolyse liegen in der Verwendung von günstigen, nicht-toxischen Lösungsmitteln, der Rückgewinnung unbeschädigter Fasern sowie der nahezu vollständigen Entfernung der Polymermatrix. Im Vergleich zu thermischen oder mechanischen Recyclingverfahren ist der Energiebedarf dieses Verfahrens jedoch deutlich höher, und somit mit hohen Kosten verbunden (Krauklis et al. 2021; Dorigato 2021).

Die Kombination aus hohen Betriebskosten und teuerem Equipment sind Grund dafür, dass sich dieses Verfahren bisher nicht über eine Anwendung im Labormaßstab hinaus etablieren konnte (Dorigato 2021). Der Technologiereifegrad der superkritischen Solvolyse wird sowohl für GFK, als auch für CFK, mit 4 angegeben (Bennet 2021).

Für das Recycling von Verbundwerkstoffen mittels Solvolyse hat sich Wasser als bestes Lösemittel etabliert. Um die Reaktionszeiten zu reduzieren, können organische Lösemittel, wie Alkohole, Phenole, Amine oder alkalische Katalysatoren wie Natriumhydroxid (NaOH) oder Kaliumhydroxid (KOH), hinzugefügt werden (Oliveux et al. 2015).

Auch im superkritischen Bereich haben sich Wasser und Benzylalkohol zum Recycling von Verbundwerkstoffen als geeignet erwiesen (Kumar und Krishnan 2020). Um die Reaktionsbedingungen zu mildern und somit die Kosten zu senken, können statt Wasser auch andere Lösemittel wie Alkohole oder Aceton und Katalysatoren eingesetzt werden, wodurch sich Druck und Temperatur deutlich reduzieren lassen, wie in Tabelle 59 dargestellt ist (Oliveux et al. 2015).

Tabelle 59: Kritische Drücke und Temperaturen ausgewählter Lösemittel.

	Kritischer Druck [bar]	Kritische Temperatur [°C]
Wasser	221	374,1
Methanol	79,5	240
Ethanol	63,9	243,1
Isopropanol	53,7	235,6

Quelle: Eigene Zusammenstellung und Übersetzung, KIT-ITC, nach Morin et al. (2012).

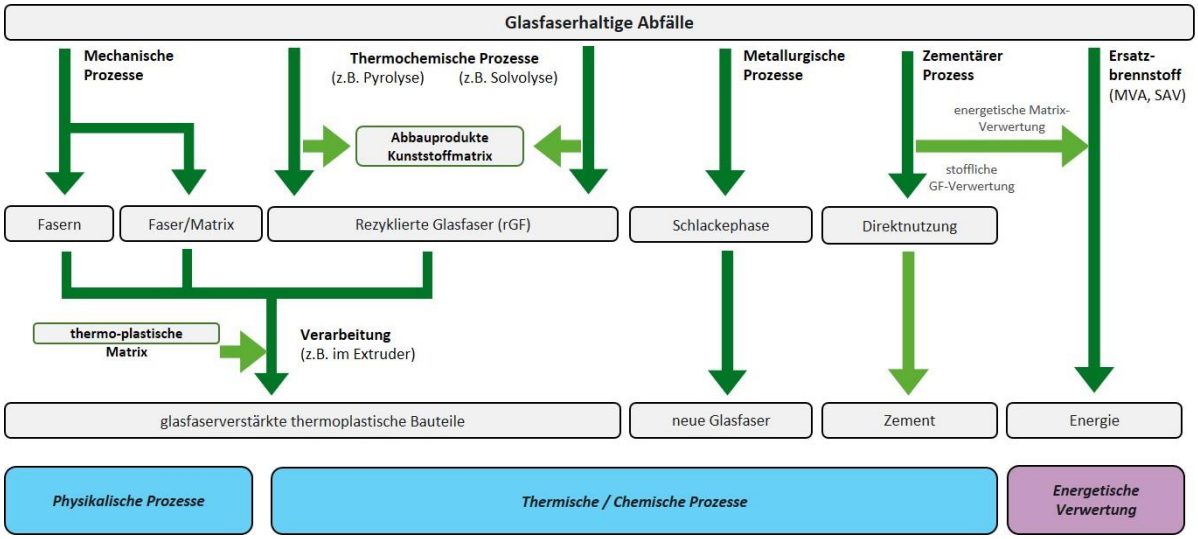
6.3 Verwertung von glasfaserverstärkten Kunststoffen (GFK)

Glasfaserverstärkte Kunststoffe werden sowohl mit duroplastischer Matrix (z. B. Polyester- oder Epoxidharz), als auch mit thermoplastischer Matrix (z. B. Polyamid) hergestellt. Für Rotorblätter wird aktuell ausschließlich GFK mit duroplastischer Matrix eingesetzt; im Weiteren wird nur die Verwertung dieses FVW betrachtet. Prozesse einer kommerziellen Verwertung von glasfaserhaltigen Abfallströmen sind bisher nur eingeschränkt verfügbar. Prinzipiell kommen physikalische, thermochemische, chemische und metallurgische Prozesse sowie ein Co-

Processing in Betracht. Kommerziell ist bisher nur die GFK-Verwertung im Zementwerk etabliert. Alle in Frage kommenden Prozesse sind in Abbildung 151 schematisch dargestellt.

Ziel einiger dieser Prozesse ist die Gewinnung von rGF als stoffliche Verwertung, wobei das gewonnene Material meist gegenüber Neufasern eine geringere Qualität aufweist, was insbesondere für physikalische (mechanische), aber auch thermochemische und chemische Prozesse zutreffen kann. Kommerziell etabliert bezüglich der industriellen Verwertung von GFK-Abfällen ist der Einsatz bei der Klinkerherstellung im Zementwerk, wobei die siliziumhaltigen Glasfasern zur Substitution anderer Rohstoffe genutzt und die Matrix energetisch verwertet wird. Andere Verfahren des thermochemischen, bzw. chemischen Recyclings sind aktuell bezüglich des geringen TRL nicht am Markt verfügbar, und deren Wirtschaftlichkeit für ein GFK-Recycling ist bezüglich des geringen Marktwertes von Glasfaseren genauer zu betrachten (Pickering 2006; Pickering et al. 2000)

Abbildung 151: Übersicht zu potentiellen Verfahrensrouten der Verwertung glasfaserhaltiger Abfälle inkl. der jeweils entstehenden Hauptprodukte sowie der abfallrechtlichen und technologischen Einordnung.



Quelle: Eigene Darstellung, KIT-ITC.

6.3.1 Prozesse zum Recycling von GFK

Einige Prozesse, entsprechend Abbildung 150, sind geeignet, Glasfasern zu recyceln (stoffliche Verwertung). Wichtig für solche Prozesse ist die Qualität der gewonnenen rGF, die deren Vermarktbarkeit bestimmen. So wurden zum Beispiel im Projekt CosiMo (Composites for Sustainable Mobility) von DLR (DLR - Zentrum für Leichtbauproduktionstechnologie 2021), Universität Augsburg und einem Industriekonsortium Basistechnologien zu Fertigungsprozessen entwickelt, mit einer prototypischen Umsetzung eines Bauteils aus recycelten Glasfasern.

Duroplaste und insbesondere GFK galten lange Zeit als nicht recycelfähig (Bledzki 1997), da diese im Herstellungsprozess durch die irreversible chemische Vernetzung der Matrix aushärten, sodass sie gegenüber Thermoplasten über keine schmelzflüssige Phase beim Erhitzen verfügen. Prozesse des Recyclings von Thermoplasten sind nur sehr eingeschränkt auf duroplastische FVW übertragbar.

6.3.1.1 Mechanische Verwertung von GFK

Für duroplastische Kunststoffe gibt es den Ansatz eines funktionierenden mechanischen Recyclings, wobei deren Produkte nach einer entsprechenden Materialaufbereitung zum Beispiel als Füllstoffersatz bei Phenolharzpressmassen dienen können (Bledzki 1997). Eine Etablierung dieses mechanischen Verwertungsverfahrens wurde nach der Massenherstellung duroplastischer Bauteile für den Einsatz in der Automobilbranche vorangetrieben, da die damals eingeführte Altfahrzeug-Verordnung eine Rücknahme bzw. Verwertungsquote vorsah. Unter diesem Druck bestand die Notwendigkeit, Prozesse zur GFK-Verwertung zu etablieren, die sich zum damaligen Zeitpunkt im Wesentlichen auf eine Zerkleinerung der GFK-Bauteile zum Einsatz als Füllstoffersatz konzentrierten und der Stand zum mechanischen Recycling dieser FVW ist in zahlreichen Arbeiten beschrieben (Leonhardt 1997; Bledzki 1997).

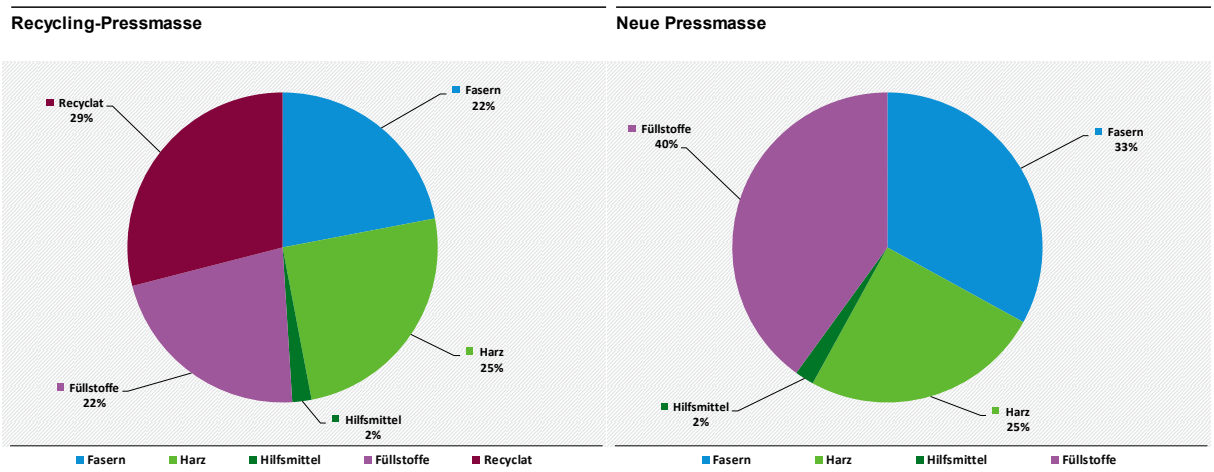
Grundsätzlich werden beim mechanischen Recycling von FVW diese zunächst in einem primären Zerkleinerungschritt, z. B. in Schneid- oder Brechmühlen, auf eine Größe von 50 bis 100 mm vorzerkleinert, womit das Entfernen von Metalleinlagerungen sowie der Transport der Bauteile erleichtert wird. In der Hauptzerkleinerungsstufe wird das Material z. B. in Hammermühlen oder anderen Hochgeschwindigkeitsmühlen zu einem feinen Produkt mit Partikelgrößen von 10 mm bis kleiner 50 µm zerkleinert. Hierbei generieren Schneidmühlen längere Fasern mit einer homogeneren Faserlängenverteilung als Hammermühlen. Diese Mühlen unterliegen jedoch allgemein einem größeren Verschleiß (Schinner et al. 1996).

In einem anschließenden Klassierprozess wird das entstandene Rezyklat mithilfe von Zyklonen und Sieben in unterschiedliche Größenfraktionen sortiert. Dabei sind die feineren Fraktionen üblicherweise partikelförmig und enthalten einen höheren Anteil an Füllstoffen als das Ausgangsmaterial und können hauptsächlich als Füllstoffersatz eingesetzt werden. Die gröberen Fraktionen bestehen überwiegend aus faserförmigen Objekten mit einem hohen Aspektverhältnis und dienen zur Verstärkung in SMC- und BMC-Produkten (Pickering 2006; Dorigato 2021).

Unter dem Begriff Partikelrecycling wurde die Einbindung zerkleinerter GF-haltiger duroplastischer Materialien als hochwertige Füllstoffe für SMC[8] Anwendungen mit einer möglichst faserverstärkenden Wirkung untersucht. Abbildung 152 zeigt die Zusammensetzungen der Einsatzstoffe für eine SMC-Anwendung mit Ersatz des Füllmaterials durch ein mittels Partikelrecycling aufbereiteten GFK-Materials (Bledzki 1997).

[8]Als Sheet Molding Compound werden plattenförmige Pressmassen bezeichnet, die aus vorgemischten Verstärkungsfasern und meist aus duroplastischen Harzen bestehen.

Abbildung 152: Zusammensetzung von Pressmassen mit und ohne GFK-Partikelrecyclat für SMC-Anwendung.



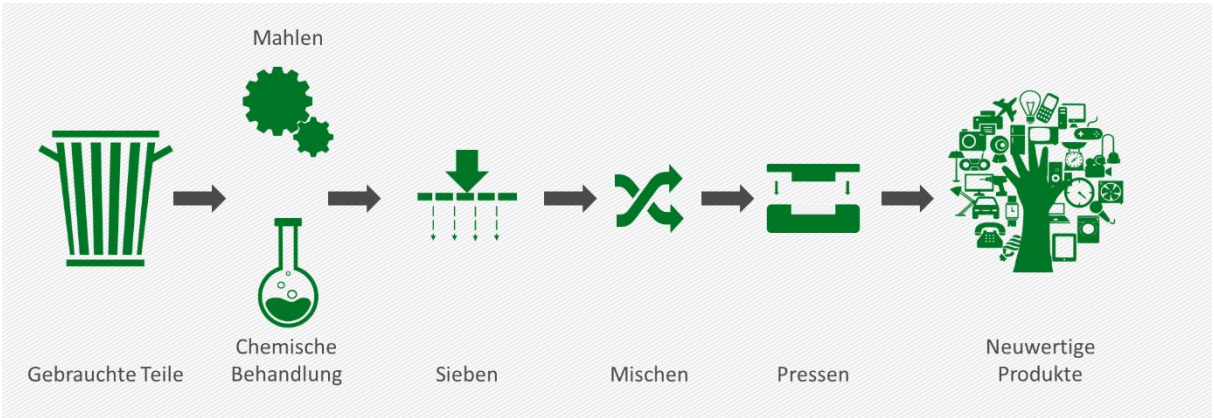
Quelle: Eigene Darstellung, KIT-ITC, nach Bledzki (1997).

Die Entwicklung eines mechanischen Prozesses zur GFK-Verwertung zur Herstellung eines Füllstoffersatzmaterials erfolgte in Deutschland maßgeblich am Institut für Werkstofftechnik der Universität Kassel. Der Prozess wurde nach der Entwicklungsphase großtechnisch von der Firma ERCOM Composite Recycling GmbH-Kunststoffaufbereitung in Rastatt mit einer Verwertungskapazität von 5.000 t/a realisiert und zwischen 2002 bis 2009 betrieben.

Diese Entwicklung und kommerzielle Einführung wurde von verschiedenen Seiten gefördert. Der Aufbau der ERCOM-Anlage wurde unter anderem von BASF, Vetrotex, Menzolit und Owens-Cornig unterstützt (Bledzki und Goracy 1993). Ähnliche Ansätze wurden in Europa noch von den Firmen Mecelec Composites et Recyclage (MCR, Frankreich), Volcar (Italien), Lonza (Italien), Milijotek (Norwegen) sowie in den USA durch Phoenix Fiberglass, Mashall Company, Premix, und in Asien durch JRPS verfolgt (Japan) (Bledzki et al. 2021; Derosa et al. 2005).

Abbildung 153 zeigt schematisch die von ERCOM entwickelte Prozesskette, beginnend mit einer Vorzerkleinerung des GFK-Abfallstroms (links), einer nachfolgenden Feinzerkleinerung und in den weiteren Schritten deren Aufbereitung zu einem Füllstoffersatzmaterial, für den Einsatz bei der Herstellung neuer Produkte.

Abbildung 153: Verfahrenskette zum Partikelrecycling am Beispiel der Anlage von ERCOM.



Quelle: Eigene Darstellung, KIT-ITC, nach Bledzki et al. (2021).

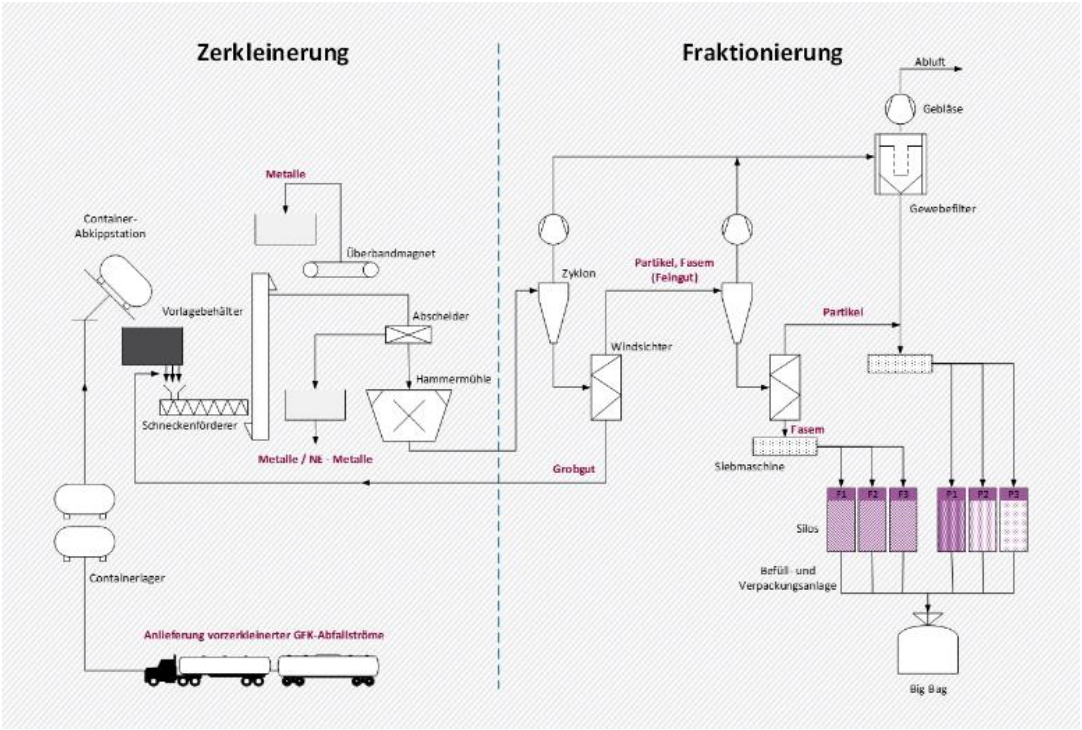
Ziel des Ercom-Verfahrens war die Zerkleinerung von SMC-Abfallströmen zur Erzeugung separater partikel- bzw. faserförmiger Fraktionen mittels geeigneter Trenneinrichtungen (Zyklon / Sieb) nach der Zerkleinerung in einer Hammermühle. Diese partikel- und faserförmigen Fraktionen wurden in je drei getrennte Größenfraktionen aufbereitet (Bledzki et al. 2021).

In Abbildung 154 ist der Prozess detailliert dargestellt, wobei ERCOM nur vorzerkleinertes Material annahm, das direkt für eine Verarbeitung in einer Hammermühle geeignet sein musste. Die Vorzerkleinerung der GFK-Abfallströme erfolgte beim Anlieferer, mittels eines mobilen Zweiwellenzerkleinerers (Bledzki 1997; Pickering 2006). Der vorzerkleinerte Abfallstrom besaß Abmessungen von maximal 50 x 50 mm und eine Schüttdichte von etwa 330 kg/m³ (Pickering 2006), wobei metallische Störstoffe vor der Feinzerkleinerung bei ERCOM entfernt wurden. Die Feinzerkleinerung bei ERCOM erfolgte mit einer Hammermühle, da eine solche keine wartungsintensiven Schneidwerkzeuge besitzt.

In einer nachfolgenden Fraktionierung wurde das Material in jeweils drei vorwiegend partikelförmige und faserförmige Fraktionen getrennt. Nach dieser Klassierung konnten die einzelnen Fraktionen über Lagerbehälter in Bigbag abgefüllt werden (Bledzki 1997; Pickering 2006; Bledzki und Goracy 1993). Die Fraktionierung erfolgte durch eine kombinierte zweifache Reihenschaltung aus Zyklon und Sichter. Die erste Kombination aus Zyklon und Sichter war so geschaltet, dass das Feingut des Zyklons als partikelförmige Fracht in einem Gewebefilter abgeschieden und das Grobgut des Zyklons einem Windsichter zugeführt wurde, der das Material wiederum in eine Grob- und Feinfraktion auftrennte. Die nicht mit dem Luftstrom ausgetragene Grobfraktion des Sichters wurde zur Hammermühle zurückgeführt, und die luftgetragene Feinfraktion einer zweiten Kombination aus Zyklon und Sichter zugeführt.

Die zweite Kombination war analog zur ersten aufgebaut, wobei das luftgetragene partikelförmige Feingut des Zyklons in einem Gewebefilter abgeschieden wurde. Das Grobgut des Zyklons wurde einer zweiten Trenneinrichtung zugeführt, die nicht detaillierter beschrieben wird. Erzeugt wurden eine partikel- und eine faserförmige Fraktion, die direkt den jeweiligen Siebmaschinen zugeführt wurden.

Abbildung 154: Verfahrensfließbild des ERCOM-Prozesses zur Aufbereitung von FVW.



Quelle: Eigene Darstellung, KIT-ITC, nach Bledzki (1997).

Die Aufteilung in drei partikelförmige (P1, P2, P3) und drei faserförmige (F1, F2, F3) Fraktionen erfolgte jeweils mit einer Taumelsiebmaschine; die Stoffdaten der so erzeugten Fraktionen sind in Tabelle 60 aufgelistet.

Tabelle 60: Eigenschaften der Rezyklat-Produkte des ERCOM-Prozesses.

Eigenschaften	P1	P2	P3	F1	F2	F3
Korngröße [mm]	< 0,2	0,2 – 0,5	> 0,5	< 0.,5	0,5 – 1,25	> 1,25
Faserlänge [mm]	< 0,25	0,25 – 0,3	3 - 15	0,5 - 3	3 – 6	6 - 20
Dichte [kg/m^3]	1.800	1.900	1.900	1.700	1.700	1.800
Schüttdichte [kg/m^3]	650	300	160	600	450	260
Material [Gew.-%]						
Glasfaser	45	47	47	42	53	46
Harz	41	35	36	36	33	30
Kreide (Originalfüller)	14	18	17	22	14	24

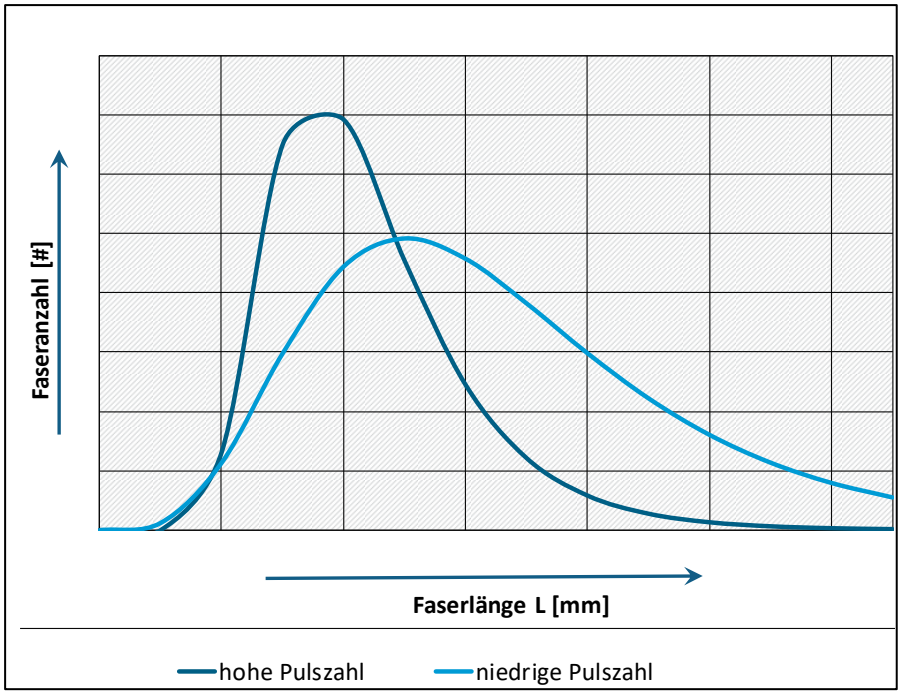
Quelle: Eigene Zusammenstellung und Übersetzung, KIT-ITC, nach (Derosa et al. 2005).

Palmer (2009) untersuchte die Qualität von rGF, die in einer Hammermühle Typ Granulator der Firma TRIA zerkleinert wurden. Diese wiesen 70 bis 82 % der ursprünglichen Zugfestigkeit und 77 bis 83 % der ursprünglichen Bruchdehnung auf, während der E-Modul nur unwesentlich beeinflusst wurde.

6.3.1.2 GFK-Auftrennung mittels Hochspannungs-Fragmentierung

Prozesse zur Fragmentierung von GFK mittels Hochspannung sind bisher maßgeblich im Labormaßstab durchgeführt worden. Zu EDF, wo der Durchschlag im Material initiiert wird, gibt es etliche Laboruntersuchungen, wie von Mativenga et al. (2016), wo das mechanische Recycling von GFK (Partikelrecycling) mit einer EDF-Technologie jeweils im Labormaßstab verglichen wurde. Die mechanische Zerkleinerung erfolgte mit einem Wittmann MAS1 Mini-Granulator, die HV-Fragmentierung mit einer EDF-Laboranlage der Firma SELFRAG. Abbildung 155 zeigt die Faserlängenverteilung der mittels EDF gewonnenen GF in Abhängigkeit der Anzahl aufgegebener HV-Pulse bei einer Pulsfrequenz von 1 Hz. Eine Erhöhung der Pulsanzahl bewirkt eine schmalere Faserlängenverteilung mit etwas geringerer mittlerer Faserlänge.

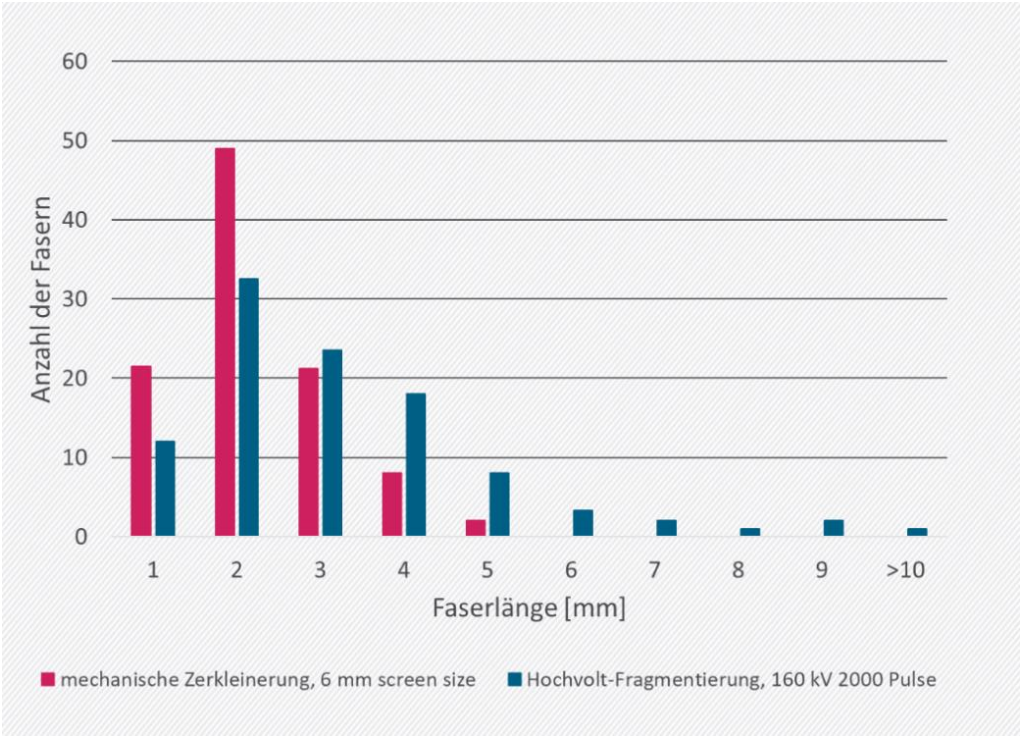
Abbildung 155: Faserlängenverteilung der mittels Hochvolt-Fragmentierung rezyklierten GF in Abhängigkeit der Pulsanzahl bei einer Pulsfrequenz von 1 Hz.



Quelle: Eigene Darstellung, KIT-ITC, qualitativ nach Mativenga et al. (2016).

Vergleicht man die mittels mechanischer Zerkleinerung gewonnen GF mit denjenigen der EDF-Fragmentierung, so besitzen diese eine breitere Längenverteilung, bei einem relativ identischen Mittelwert der Faserlänge von etwa 2 mm, wobei der Großteil der Fasern für beide Verfahren kürzer 5 mm ist (Abbildung 156).

Abbildung 156: Vergleich der Faserlängenverteilung zwischen mechanischer Zerkleinerung und der Hochvolt-Fragmentierung von GFK.



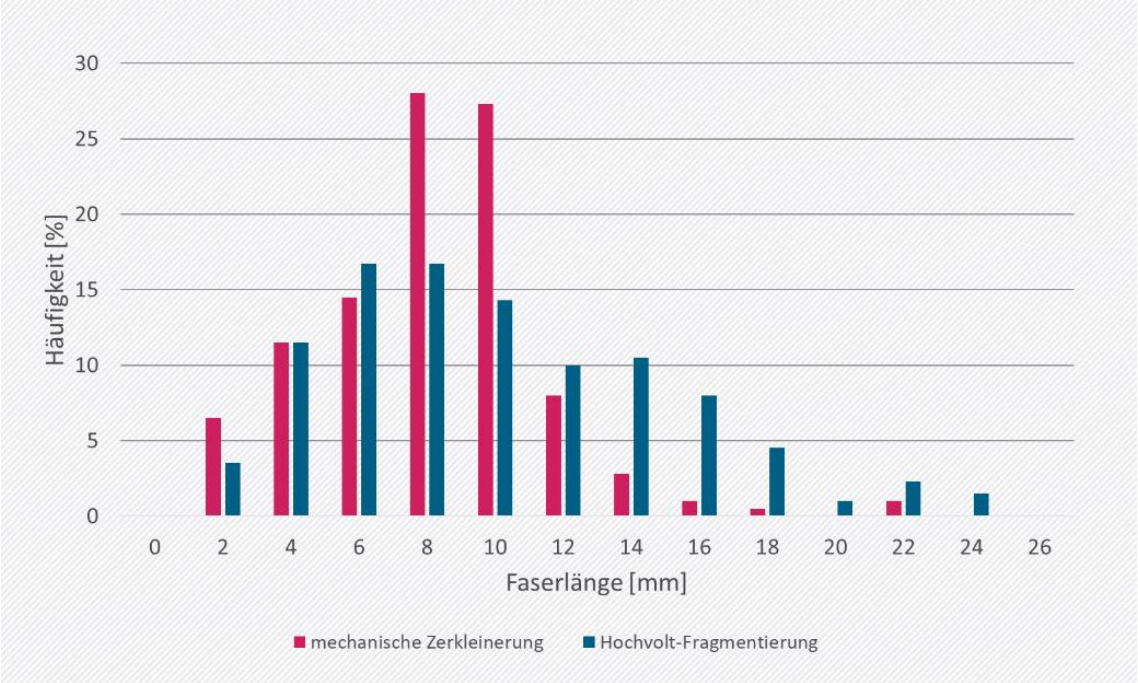
Quelle: Eigene Darstellung, KIT-ITC, nach Mativenga et al. (2016).

Der Anteil an Restanhaftung von Harz an so gewonnenen GF ist beim EDF-Prozess deutlich geringer, wobei der Anteil umso geringer ist, je mehr HV-Pulse aufgegeben werden. Die Rezyklate beider Recyclingverfahren sollen als Füllstoffersatz in Bulk-Moulding Compound (BMC) oder Sheet Moulding Compound (SMC) laut Mativenga et al. (2016) geeignet sein.

Der spezifische Energieeintrag wurde für Versuche mit 500 bis 2000 elektrischen Impulsen zu 17,1 bis 89,1 MJ/kg bestimmt bei Verarbeitungsraten kleiner 0,15 kg/h (Mativenga et al. 2016).

In Untersuchungen von Rouholamin et al. (2014) wurde ebenfalls die mechanische Zerkleinerung mit dem EDF-Prozess verglichen. Die mechanische Zerkleinerung erfolgte mit einer Alpine UPZ-II Hammermühle und die EDF-Untersuchungen gleichfalls mit einer Laboranlage der Firma SELFRAG, mit einer angelegten Spannung von 150 kV. Die Untersuchungen zeigen, dass mittels EDF gewonnene GF weniger Restharzanhaftung besitzen, aber eine breitere Faserlängenverteilung aufweisen. Die Faserlängenverteilungen der bei diesen Untersuchungen gewonnenen GF (Abbildung 157) zeigen den gleichen Trend wie in den zuvor beschriebenen Untersuchungen von Mativenga et al. (2016), und die EDF-Rezyklat-Fasern weisen gleichfalls eine breitere Längenverteilung auf, wobei längere Fasern bis 24 mm gewonnen werden konnten (Rouholamin et al. 2014).

Abbildung 157: Vergleich der GF-Längenverteilungen zwischen mechanischer Zerkleinerung (rot) und Hochvolt-Fragmentierung (blau).



Quelle: Eigene Darstellung, KIT-ITC, nach Rouholamin et al. (2014).

Neben den Längenverteilungen wurden bei diesen Untersuchungen auch die mechanischen Eigenschaften der Rezyklat-Fasern bestimmt (Tabelle 61), wobei diese bei beiden Recycling-Verfahren weitgehend erhalten bleiben, aber EDF bessere Ergebnisse bzw. geringere Abweichungen zu primären Fasern liefert.

Tabelle 61: Gegenüberstellung der mechanischen Eigenschaften von primären Glasfasern sowie von mittels mechanischer Zerkleinerung und Hochvolt-Fragmentierung (HVF) gewonnener Glasfasern.

Faser	Zugfestigkeit [GPa]	Elastizitätsmodul [GPa]	Bruchdehnung [%]	Durchmesser [µm]
Primär	2,14 ± 0,81	63,48 ± 26,68	6,73 ± 2,81	15,91 ± 1,73
Sekundär (EDF)	1,89 ± 0,53	55,65 ± 15,83	3,98 ± 1,67	15,57 ± 1,09
Sekundär (mechanisch)	1,73 ± 0,66	39,1 ± 17,78	3,96 ± 1,75	15,58 ± 1,68

Quelle: Rouholamin et al. (2014).

6.3.1.3 GKF-Verwertung im Wirbelschichtreaktor

WS-Verfahren sind für eine GFK-Verwertung prinzipiell geeignet, wo allgemein die Polymermatrix thermisch zersetzt und dadurch die GF freigelegt werden. Dieser Prozess sollte auch für verunreinigte GFK-Abfallfraktionen geeignet sein, die zum Beispiel eine Beschichtung besitzen, die als organische Verbindung mit der Polymermatrix zersetzt und die anorganischen GF freigelegt werden. Weitere Verunreinigungen, wie beispielsweise Metalle, die im GFK enthalten sein können, sinken im WS-Reaktor ab und können dem Reaktor separat entnommen werden. Die freigelegten Fasern werden mit der Gasströmung aus dem WS-Reaktor ausgetragen und können mit geeigneten Verfahren abgetrennt werden. Hierbei liegt neben der Faserfraktion noch eine partikelförmige Fraktion (Matrixbestandteile) vor, die mittels geeigneter Apparate abzutrennen ist.

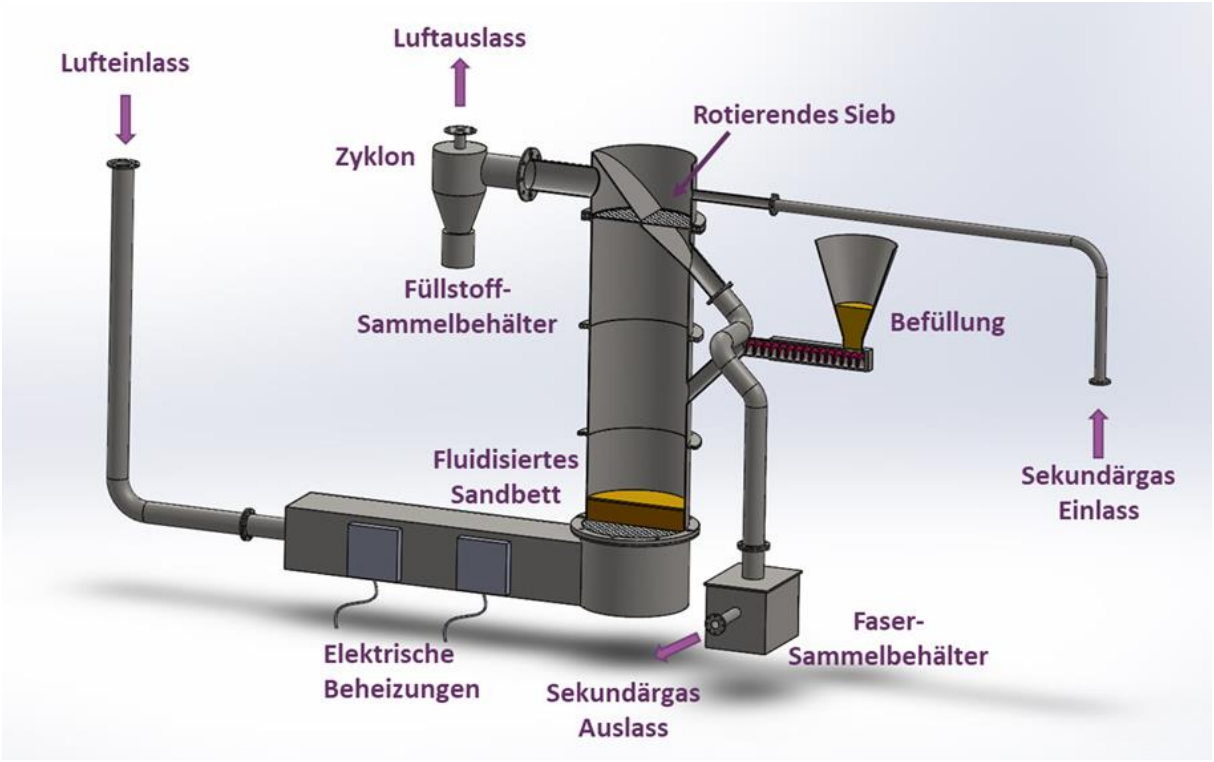
Untersuchungen zum GFK-Recycling in einer WS wurden maßgeblich von der „Composites Research Group“ der Universität in Nottingham durchgeführt, die sich langjährig mit FVW in diversen Arbeitsgruppen, insbesonders in der Arbeitsgruppe „Recycling of Composites“ beschäftigt hat. Die GFK-Verwertung wurde in einem eigens entwickelten WS-Reaktor im Labormaßstab dabei untersucht (Pickering 2006).

Dieser WS-Reaktor wurde zunächst für die Verwertung von GFK eingesetzt, bis in einer strategischen Kooperation mit der Firma Boeing Company ab 2012 die CFK-Verwertung in den Mittelpunkt der Untersuchungen rückte, wozu eine WS-Pilotanlage im Technikumsmaßstab entwickelt wurde. Eine Zusammenarbeit mit Boeing bestand schon seit 2006, und durch die strategische Partnerschaft konnte ab 2012 die Entwicklung des WS-Reaktors durch Beisteuerung finanzieller Mittel (etwa 1 Mio. $ pro Jahr) bezüglich der CFK-Verwertung ausgebaut werden.

Untersuchungen zur GFK-Verwertung wurden in Nottingham im Projekt AIRPOWER (Affordable innovative rapid production of offshore wind energy rotor-blades) durchgeführt, wobei der Fokus dieses Projekts auf dem Design und der Herstellung von Rotorblättern lag.

Der WS-Laborreaktor, in dem vorwiegend Untersuchungen zur GFK-Verwertung durchgeführt wurden, besitzt ein TRL von 4. Der Reaktor besteht aus drei übereinander angeordneten Rohrabschnitten (Abbildung 158) mit einem Innendurchmesser von 0,312 m. Im unteren Teil des Reaktors befindet sich ein 15 cm hohes Quarzsandbett (Partikelgröße 0,5 bis 0,8 mm) auf einer perforierten Platte. Im mittleren Reaktorteil erfolgt die Zugabe der GF-haltigen Abfälle über einen Schneckendosierer und einen Einfülltrichter, wobei das Aufgabegut mittels einer Hammermühle auf eine Größe von etwa 25 mm zerkleinert wurde. Im oberen Teil des Reaktors (Freebord) erfolgt eine Rückhaltung des fluidisierten Sandes, und oberhalb dieser Zone ist ein rotierender Siebabscheider (60 U/min) mit einer Maschenweite von 1,2 mm installiert. Dieses Sieb soll die faserförmige Fraktion abtrennen, während Füllstoffpartikeln mit dem Trägergasstrom das Sieb passieren, ausgetragen und nachfolgend in einem Zyklon abgeschieden werden. Die mittels des rotierenden Siebs abgetrennten Fasern werden in einem Gewebefilter abgeschieden. Zur Fluidisierung wird Luft verwendet, die in einem vorgeschalteten elektrischen Erhitzer auf maximal 750 °C aufgeheizt wird, wobei das Aggregat eine max. Heizleistung von 43 kW besitzt (Pickering et al. 2000).

Abbildung 158: WS-Reaktor im Labormaßstab der Universität Nottingham.



Quelle: Eigene Darstellung, KIT-ITC, nach Pickering et al. (2000).

Die Untersuchungen zeigen, dass in Abhängigkeit von der Prozesstemperatur eine erhebliche Reduktion der Festigkeit der wiedergewonnenen Fasern im Vergleich zum Ausgangsmaterial vorlag, die sich um 50 % bei 450 °C, bzw. 80 % bei 550 °C und 90 % bei 650 °C reduzierte, wobei die Steifigkeit nicht wesentlich beeinflusst wurde. Bei einer Faserausbeute von 44 bis 46 % wurde eine hohe Verunreinigung von 15 bis 24 % der gesammelten Fasern durch Füllstoffe ausgemacht, was durch ein anschließendes Waschen der Fasern auf unter 8 % reduziert werden konnte. Dabei ist anzumerken, dass die Faserausbeute abhängig von der Prozesstemperatur und –dauer, der Fluidisierungsgeschwindigkeit und den Einstellungen des rotierenden Trennsiebes war (Pickering et al. 2000).

Für die GFK-Verwertung wird empfohlen, die WS mit einer moderaten Temperatur von 450 °C, mit einer Fluidisierungsgeschwindigkeit von 1,0 bis 1,3 m/s und einer Verweilzeit zwischen 30 bis 90 min, zu betreiben.

Eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung des Prozesses mit einem einfachen Ansatz hat ergeben, dass eine solche Anlage für eine Kostendeckung einen Jahresdurchsatz von 9.000 t haben sollte, wobei von einer Fasergewinnung von 67,5 % und einer Produktreinheit von 89 % ausgegangen wird (Pickering et al. 2000).

Untersuchungen an der Universität Strathclyde zeigen, dass CuO-Nanopartikeln das thermische Abbauverhalten von Epoxidharz begünstigen, sodass Prozesse zum thermischen Recycling von GF-haltigen FVW mit Epoxidmatrix bei geringerer Temperature durchgeführt werden können. Dies ergibt zum einen eine bessere Energieeffizienz des Prozesses, und bessere mechanische Eigenschaften der gewonnenen rGF. Laboruntersuchungen mittels TG zeigen, dass eine CuO-Beladung von 5 Gew.-% des Epoxidharzes die größte Reduktion der thermischen Stabilität sowie der Aktivierungsenergie bewirkt. Weiterhin wurden GF-Epoxidharz-Composite in einer WS thermisch beansprucht, wobei Fasern bei einer Temperatur von 400 °C mit einer Ausbeute von

59 % gewonnen werden konnten, was einer maximal erzielbaren Faserausbeute des WS-Prozesses von 70 % nahekommt. Eine solche Ausbeute bedingt ohne CuO im Epoxidharz eine Prozesstemperatur von 500 °C (Pender und Yang 2019). TG-Untersuchungen mit CeO_2- und CO_3O_4-Nanopartikeln zeigen gleichfalls eine Verbesserung des thermischen Abbauverhaltens des Epoxidharzes, wobei der Einfluss dieser Materialien nicht im WS-Reaktor untersucht wurde (Pender und Yang 2017).

6.3.1.4 GFK-Recycling mittels Mikrowellenpyrolyse

Grundlagenuntersuchungen zur GFK-Pyrolyse erfolgten in den letzten Jahren auch verstärkt mittels MW-Pyrolyse, jedoch meist im Labormaßstab. In der Literatur sind nur wenige Veröffentlichungen zur GFK-Pyrolyse mittels MW vorhanden, die im Vergleich zur konventionellen Pyrolyse, meist in einfachen Versuchsaufbauten (Muffelofen) durchgeführt wurden (Naqvi et al. 2018; Pimenta und Pinho 2011).

In Kapitel 6.3.1.4 ist die MW-Pyrolyse prozesstechnisch mit deren Grundlagen beschrieben. Materialien können MW absorbieren, transmittieren oder reflektieren, wobei die Absorption deren Erwärmung bewirkt. Bei GFK als FVW trägt gegenüber CFK nur die Matrix zur Absorption bei, deren Anteil gering ist. GF selbst koppeln keine Mikrowellenleistung in den Verbundwerkstoff ein.

Untersuchungen zur MW-Pyrolyse von GFK wurden an der University of Bora in Schweden in einer Laboranlage zur Verwertung von Rotorblättern durchgeführt (Åkesson et al. 2012). Bei diesen Untersuchungen lag der maßgebliche Anteil der gewonnenen rGF von ca. 52 Gew.-% mit einer Faserlänge unter 15,7 mm vor. Die so gewonnenen rGF wurden mittels thermogravimetrischer Analyse weiter untersucht und hatten noch einen organischen Anteil von 3 bis 8 Gew.-%. Die gewonnenen rGF zeigten geringere mechanische Kennwerte als Neufasern und besaßen relativ ungünstige Oberflächeneigenschaften.

Untersuchungen zur MW-Pyrolyse von FVW, deren Ergebnisse teilweise auf GFK übertragbar sind, wurden maßgeblich mit CFK in Laboranlagen (TRL ≈ 4) durchgeführt. Zur MW-Pyrolyse von GFK liegen nur wenige Untersuchungen vor, und diese Verwertungsroute wird künftig wohl nur eine untergeordnete Rolle bezüglich einer GFK-Verwertung spielen.

6.3.1.5 GFK-Recycling mittels Solvolyse

Zu den Herausforderungen des solvolytischen Recyclings von GFK zählen die langen Reaktionszeiten sowie eine hohe Reaktionstemperatur. Zu hohe Temperaturen führen zu einer Reduktion der mechanischen Fasereigenschaften, niedrige Temperaturen hingegen erhöhen die Reaktionszeiten. Eine Möglichkeit dem entgegenzuwirken ist beispielsweise eine Vorbehandlung des GFK mit Essigsäure oder Wasserstoffperoxid, wodurch die Matrix aufquillt und die Diffusion des Lösungsmittels erhöht wird, was die Reaktionszeit verkürzt (Mattsson et al. 2020). Weiterhin sind rezyklierte GF aus der Solvolyse wohl nicht für eine hochwertige Anwendung geeignet, da ihre Eigenschaften ähnlich den des mechanischen Recyclings und deshalb nur in BMC- oder SMC-Prozessen einsetzbar sind. Dabei ist zu beachten, dass die Kosten der GFK-Solvolyse höher sind, als die des mechanischen Recyclings (Oliveux et al. 2015).

Unter subkritischen Reaktionsbedingungen wird die Matrix in Monomere, Oligomere und Polymere zersetzt, die je nach ihrer Polarität sich in einer Wasser- oder Ölphase anreichern (Abbildung 159).

Abbildung 159: Schematische Darstellung der Zersetzungsprodukte beim Recycling von GFK mittels Solvolyse.

Quelle: Eigene Darstellung und Übersetzung, KIT-ITC, nach Mattsson et al. (2020).

Dabei werden Duroplaste auf Polyester-/ Vinyl-Basis durch Hydrolyse der Esterbindungen leichter zersetzt als Materialien auf Epoxid-Basis, und benötigen daher geringere Temperaturen (Mattsson et al. 2020; Oliveux et al. 2015).

Das Recycling von GFK aus Rotorblättern wurde in mehreren internationalen Projekten untersucht. Im Projekt „GENVIND“ wurden Untersuchungen mit GFK mit einer Polyestermatrix mit subkritischem Wasser bei 300 °C und 100 bar durchgeführt, wobei die Reaktionsprodukte ein Solvolyse-Öl mit einem Heizwert von 40 MJ/kg sowie GF, die eine Zugfestigkeit von 80 bis 90 % gegenüber Neufasern aufwiesen, waren (Mattsson et al. 2020).

Im Projekt „EURECOMP“ wurde ebenfalls die Solvolyse von GFK mit Polyestermatrix in Wasser bei Temperaturen von 30 bis 275 °C und Drücken zwischen 75 bis 250 bar im Labormaßstab untersucht, und die dabei optimierten Prozessbedingungen auf einen 20 Liter Batch-Reaktor übertragen. Die in dem Projekt bei 270 °C wiedergewonnenen GF wiesen 70 % der Zugfestigkeiten von vGF auf (Mattsson et al. 2020; Europäische Kommission 2012).

Untersuchungen zur Solvolyse von GFK aus Rotorblättern im Labormaßstab in einem Zwei-Stufen-Prozess mit unterschiedlichen Lösemitteln bei Temperaturen zwischen 250 bis 370 °C und Drücken zwischen 100 bis 170 bar zeigten bei längerer Behandlungsdauer bessere Ergebnisse bezüglich der Zersetzung der Matrix, als dies bei kürzeren Behandlungsdauern mit einer höheren Temperaturen der Fall war (Mattsson et al. 2020).

6.3.1.6 Zusammenfassung und Beurteilung der Prozesse zum Recycling von GFK

Die mechanischen Eigenschaften der gewonnen rGF werden bei fast allen betrachteten Verfahren gegenüber Neufasern teils erheblich reduziert. Bei der Solvolyse werden die GF des GFK relativ stark beschädigt (Oliveux et al. 2015). Im Vergleich mit anderen Verfahren zum GFK-Recycling liefert die Solvolyse hinsichtlich der Qualität der rezyklierten GF ähnliche Ergebnisse wie die Pyrolyse oder der Wirbelschichtreaktor (Tabelle 62).

Entsprechend der entwickelten Kriterien zur Durchführung einer technischen Beurteilung (Kapitel 6.1) hat lediglich die mechanische Zerkleinerung von GFK inkl. der Fraktionierung der Produkte einen TRL von 9 erreicht, konnte sich jedoch am Markt nicht etablieren. Die Jahreskapazität dieser Anlage wäre auch nicht ausreichend gewesen, um anfallende Abfallmengen zu bewältigen.

Die Produkte dieses Prozesses fallen in verschiedene partikelförmige und faserförmige Fraktionen mit unterschiedlichen Gehalten an GF und Matrix an, wobei diese Produkte nur als einfacher Füllstoffersatz einsetzbar wären, was einem „Downcycling“ gleichkommt. Weiterhin ist zu berücksichtigen, dass die GFK-Verwertung bei der Firma ERCOM 2009 eingestellt wurde.

Produkte der mechanischen GFK-Zerkleinerung sind aus verschiedenen Gründen auch nicht besonders als Füllstoffersatz in thermoplastischen Neuprodukten geeigent, da solche als Beimischung bei der Verarbeitung im Extruder zu Verschleißproblemen führen. Weiterhin ist die Dichte der GF relativ hoch im Vergleich zu anderen in diesem Bereich eingesetzten Verstärkungsfasern.

Alle weiteren betrachteten Prozesse weisen einen TRL ≤ 5 auf, sodass davon auszugehen ist, dass diese Prozesse in absehbarer Zeit keine ausreichenden Kapazitäten erreichen, um prognostizierte GFK-Abfallmengen zu verwerten. Eine Übersicht über die verbleibenden Zugfestigkeiten von rGF aus den betrachteten Prozessen ist in Tabelle 62 gegeben.

Ein GFK-Recycling mittels Pyrolyse ist auch in Anlagen vorstellbar die aktuell nur zum CFK-Recycling eingesetzt werden, da die Prozessparameter für beide FVW im Wesentlichen von der Matrix bestimmt werden. Ob dies wirtschaftlich zielführend sein könnte und den Bau weiterer Anlagen in Regionen nahe zu Windparks ermöglicht, sollte in weiterführenden Arbeiten unter Berücksichtigung von technoökonomischen und ökobilanziellen Analysen untersucht werden.

Gleiches gilt für weitere Prozesse des GFK-Recyclings, die bezüglich des TRL im Bereich ≤ 6 liegen, sodass die aktuell verfügbaren sowie in den kommenden Jahren erzielbaren Anlagenkapazitäten wahrscheinlich nicht für ein Recycling anfallender GFK-Abfallmengen bzw. einer Kombination beider anfallenden Abfallmengen aus GFK und CFK, ausreichen werden.

Tabelle 62: Verbleibende Zugfestigkeiten von in verschiedenen Prozessen rezyklierten Glasfasern (rGF) gegenüber Neufasern.

Recyclingverfahren	
Mechanische Prozesse	~ 78
Wirbelschichtreaktor	
Konventionelle Pyrolyse	~ 52
Hochvolt-Fragmentierung	
Solvolyse	~ 58

Quelle: Krauklis et al. (2021).

6.3.2 Prozesse zur Nutzung der Glasfaser als Rohstoff

6.3.2.1 Metallurgische Prozesse

Die rohstoffliche Verwertung von GFK-Abfallströmen wird in einem interdisziplinären Forschungsprojekt der TU Freiberg untersucht, bei dem eine Nutzung von Kupferschlacken in der Stahl- bzw. Glasindustrie betrachtet wird. Das Nebenprodukt der Kupferherstellung soll hierbei so aufbereitet werden, dass rückgewonnene Materialien als Sekundärrohstoff für Glasanwendungen bzw. für eine Anwendung in der Stahlindustrie genutzt werden können.

Im Institut für Nichteisenmetallurgie und Reinstoffe wurden erste Versuche mit sogenannter fayalitischer Schlacke durchgeführt, wo durch eine karbothermische Reduktion zwei Phasen erzeugt werden können, welche eine eisenhaltige Phase und eine Glasphase sind.

Allgemein enthalten diese Schlacken Eisenoxide, welche zu Eisen reduziert werden können, wenn die erkaltete Schlacke wieder auf 1.300 °C erhitzt und Kohlenstoff hinzugegeben wird. Auf diese Weise können etwa 70 % des Eisens extrahiert und somit Kupferschlacken prinzipiell nicht nur für den Einsatz in der Stahl-, sondern auch in der Glas- und Mineralfaserindustrie aufbereitet werden. Die hohen Eisengehalte im Stoffgemisch verhindern bisher, dass aus diesem Nebenprodukt der Kupferverhüttung ein Glasprodukt hergestellt werden kann.

Im Institut für Glas und Glastechnologie werden in der Abteilung für Energie- und Rohstoffeffiziente Glastechnologie diese Schlacken genauer erforscht und mittels chemischer Modifikationen so verändert, dass sie für ein Glasprodukt verwendbar sein sollten. Untersucht

wird hierbei, wie die Eigenschaften der Glasphase der Schlacke eingestellt werden muss, sodass daraus gewonnene Fasern künftig im Baustoffbereich, zum Beispiel für textile Gewebe oder für Hochtemperaturanwendungen, einsetzbar sind.

Der Einsatz von GFK-Abfällen für eine stoffliche Verwertung zur Gewinnung von Glas wird an der TU-Freiberg im Projekt "Alternative Fasermaterialien auf Basis von Kupferschlacken zu Glasfasern" untersucht (TU Bergakademie Freiberg 2021a). Untersucht wird die Rückführung der in Abfällen enthaltenen Rohstoffe in den Wertstoffkreislauf und eine Überführung von Abfällen in neue innovative Materialien, wobei silikatische Schlacken in technische GF überführt werden sollen. Diese silikatischen Schlacken können zum Beispiel Anwendung in der Baustoffindustrie als Füll- oder Zuschlagsstoff, als GF-Matten für Feuerfestmaterialien oder in textilen Garnen, z. B. für Hitzeschutzgewebe, finden. Die Auftrennung der Kupferschlacke in eine Eisen- und eine Glasphase hängt maßgeblich von deren chemischer Zusammensetzung ab, was in der Praxis nicht immer im Detail bekannt ist, weshalb Prozessessimulationen notwendig sind, um den Effekt variierender Schlackenzusammensetzungen auf die Dauer der Phasentrennung anhand mathematisch-physikalischer Modelle zu ermitteln (TU Bergakademie Freiberg 2021b).

In diesem Projekt wird neben der direkten Überführung durch gezielte Ausnutzung von Phasenseparationsprozessen die Rohstoffkomponente abgetrennt und ein metallisches Konzentrat hergestellt, wodurch der färbende, metallische Anteil im Glas reduziert und für eine metallurgische Weiterverarbeitung extrahiert werden kann. Mit diesem Wissen kann künftig eine Gewinnung neuer Glasprodukte in metallurgischen Prozessen möglich sein, wobei GFK direkt in den Prozess zugegeben wird, sich die Siliziumphase der GF in der Schlacke anreichern und eine Trennung der metallischen Phase von der schmelzflüssigen Schlacke möglich ist.

6.3.2.2 Einsatz bei der Zementklinker-Herstellung

GFK-haltige Abfallströme werden in Deutschland kommerziell in größeren Mengen nach deren Aufbereitung bei der Zementklinkerherstellung verwertet, wobei dies ausschließlich im Zementwerk Lägerdorf der Firma Holcim (Deutschland) GmbH erfolgt. Der LAGA-Abschlussbericht (Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) 2019) gibt zur Entsorgung faserhaltiger Abfälle an, dass Monofraktionen nicht in Abfallverbrennungsanlagen eingesetzt werden sollen und falls doch, deren Dosierung nur in verträglichen Mengen erfolgen soll. Bekannt ist, dass eine erhebliche Menge an GFK-Abfällen als Produktionsabfälle anfallen, die bei der Herstellung von Rotorblätter bis zu 30 % der Produktionsmasse betragen kann, weshalb aus dem Produktionsprozess der Rotorblätter ein Großteil der GF-Abfallmasse anfällt und diese auf 11.000 t/a geschätzt wird. Der jährliche Zubau an Rotorblättern wird mit 47.000 t/a geschätzt, was bei einem GFK-Anteil von 70 Gew.-% einer GFK-Menge von 30.000 t/a entspricht. Zur Menge des jährlich in Deutschland anfallenden GFK-Abfalls liegen dem LAGA Ad-hoc-Ausschuss keine konkreten Zahlen vor. Als Annäherung wird als Referenz die in Deutschland produzierte GFK-Masse von 440.000 t/a angesetzt. Weiterhin wird in dem LAGA-Bericht angegeben, dass teilweise GFK-Abfälle zerkleinert über den Hausmüll oder Gewerbeabfall entsorgt werden.

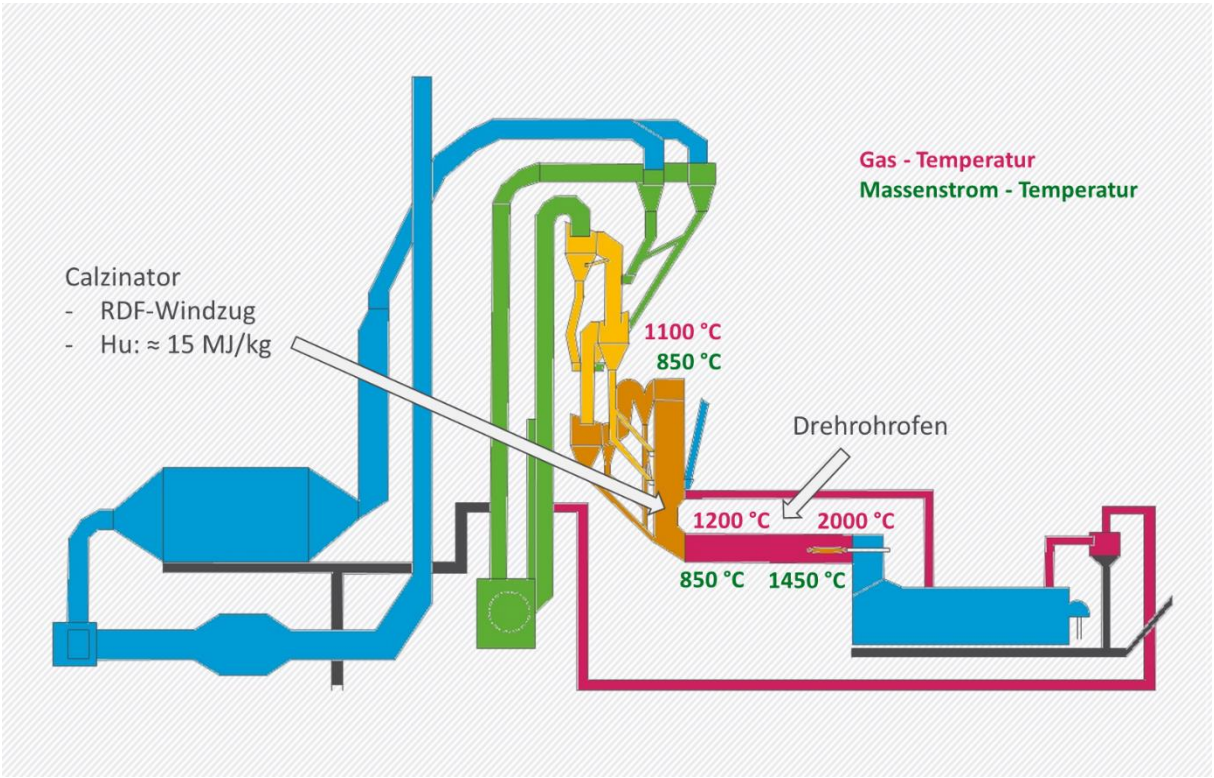
Zum Verständnis der GFK-Verwertung im Zementwerk wird zunächst ein Zementwerk allgemein beschrieben, wo aus einer Rohmehlmischung Zementklinker gebrannt wird. Hierzu wird das Rohmehl zunächst im Wärmetauscher bzw. Kalzinator entsäuert, was auch als Kalzinierug bezeichnet wird. Ein Zementwerk wird in einer Gegenstromanordnung bezüglich des Feststoffs, der als Rohmehlmischung aufgegeben wird, zur Gasströmung, die allgemein in Primär-, Sekundär- und teils Tertiärluft unterteilt wird, betrieben. Hierbei erfolgt die Primärluftzugabe über den Hauptbrenner, der am Ofenkopf installiert ist und in das Drehrohr hineinragt. Die Sekundärluft wird über den Klinkerkühler zugeführt und gelangt über den Ofenkopf in den Drehrohrofen und durch dieses in den Kalzinator, falls das betrachtete

Zementwerk über einen solchen verfügt. Weiter gelangt der Abgasstrom in den Wärmetauscher, der allgemein als mehrstufige Zyklonanordnung ausgeführt ist. Im Kalzinator, der zwischen Drehrohr und Wärmetauscher (Zykonstufen) installiert ist, werden allgemein stückige Ersatzbrennstoffe eingesetzt. Für die Verbrennung der Ersatzbrennstoffe wird ausreichend Verbrennungsluft benötigt, die teils als Tertiärluft am Ofenkopf abgezweigt und im Bypass mittels der Tertiärluftleitung um das Drehrohr direkt zum Kalzinator geführt wird.

Die Hauptkomponenten eines Zementwerks werden nachfolgend kurz beschrieben, da deren Funktionweisen zum Verständnis der GFK-Verwertung notwendig sind. Wie dargelegt, besitzt ein Zementwerk eine Gegenstromanordnung bezüglich des Feststofftransports und der Gasströmung, und die nachfolgend aufgelisteten Hauptkomponenten folgen dem Feststoffpfad, beginnend mit der Feststoffaufgabe der Rohmehlmischung oben in den Wärmetauscher:

- Wärmetauscher
- Kalzinator
- Einlaufkammer
- Drehrohrofen
- Ofenkopf
- Tertiärluftleitung
- Klinkerkühler.

Abbildung 160: Aufbau eines Zementwerks.

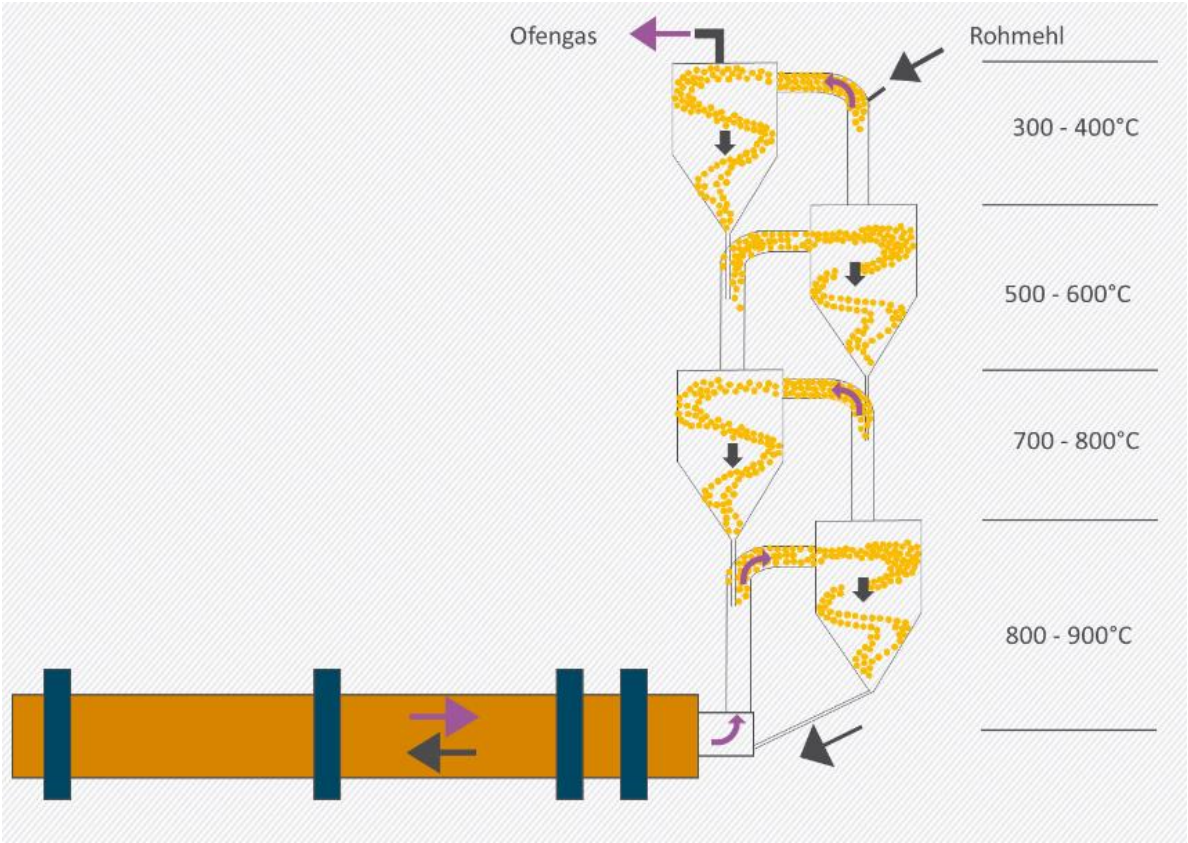


Quelle: Eigene Darstellung, KIT-ITC, nach Lange (2020).

Wärmetauscher

Der Wärmetauscher in einer Zementklinker-Brennanlage ist dem Kalzinator und dem Drehrohrofen vorgeschaltet. Hierin wird im Gegenstrom das aufgegebene Rohmehl vom aufsteigenden Gasstrom vorgewärmt und teils bis zu einem Entsäuerungsgrad von ca. 95 % kalziniert. Abhängig vom Feuchtegehalt des Rohmaterials und der Anlagenkapazität gibt es ein- bzw. zweistrangige Ausführungen des Wärmetauschers, der aus bis zu fünf Zyklonstufen bestehen kann. Hierbei werden die unteren Zyklonstufen des Wärmetauschers thermisch sowie chemisch so stark belastet, dass diese eine feuerfeste Ausführung benötigen (Refratechnik Holding GmbH 2021b).

Abbildung 161: Wärmetauscher eines Zementwerks.



Quelle: Eigene Darstellung, KIT-ITC, nach Achternbosch und Bräutigam (2000).

Kalzinator

Der Kalzinator schließt sich bezüglich des Feststoffstroms an den Wärmetauscher an, wobei eine weitere Entsäuerung bzw. Kalzinierung des Rohmehls bis zu 95 % erfolgt. Die im Kalzinator eingebrachte Energie kann bis zu 60 % der gesamten Feuerungswärmeleistung der Zementklinkerbrennanlage entsprechen. Der Kalzinator wird allgemein mit Ersatzbrennstoffen betrieben, und für deren Verbrennung wird teils Tertiärluft in den Kalzinator geleitet. Durch eine spezifische Anordnung der Tertiärluftzufuhr kann eine gestufte Verbrennung als Primärmaßnahme zur Senkung der Stickoxidwerte erfolgen. Im Bereich der Kalzinatorbrenner besteht durch den Einsatz der Ersatzbrennstoffe eine erhöhte Anforderung an das Feuerfestmaterial und oberhalb der Brennstoffzuführung im Kalzinator sinkt die Prozesstemperatur auf 850 °C bis 900 °C ab (Refratechnik Holding GmbH 2021a).

Einlaufkammer

Die Einlaufkammer stellt die Verbindung des Wärmetauschers bzw. des Kalzinators zum Drehrohrofen dar.

Drehrohrofen

Der zum Auslauf hin geneigte Drehrohrofen fördert das vorkalzinierte Rohmehl durch Rotation von der Einlaufkammer mit steigender Temperatur bis zum Abwurfbereich am Ofenkopf in den Klinkerkühler. Bei einer Materialtemperatur im Gutbett von bis zu 1450 °C bildet sich die gewünschte Klinkerphase aus, wobei bezüglich des Materialstroms folgende Zonen vorliegen:

- Einlauf
- Vorwärmzone
- Kalzinierzone
- Obere Übergangszone
- Brennzone
- Untere Übergangszone
- Auslaufbereich.

Ofenkopf

Über den Ofenkopf erfolgt der Abwurf des Klinkermaterials aus dem Drehrohrofen in den Klinkerkühler. Gleichzeitig wird der Gasstrom aus dem Klinkerkühler durch den Ofenkopf in das Drehrohr geleitet. Tertiärluft wird in kleineren Anlagen überwiegend am Ofenkopf entnommen, bei größeren Anlagen erfolgt diese Abnahme kurz hinter dem Ofenkopf. Der Hauptbrenner ragt über den Ofenkopf in das Drehrohr hinein.

Tertiärluft

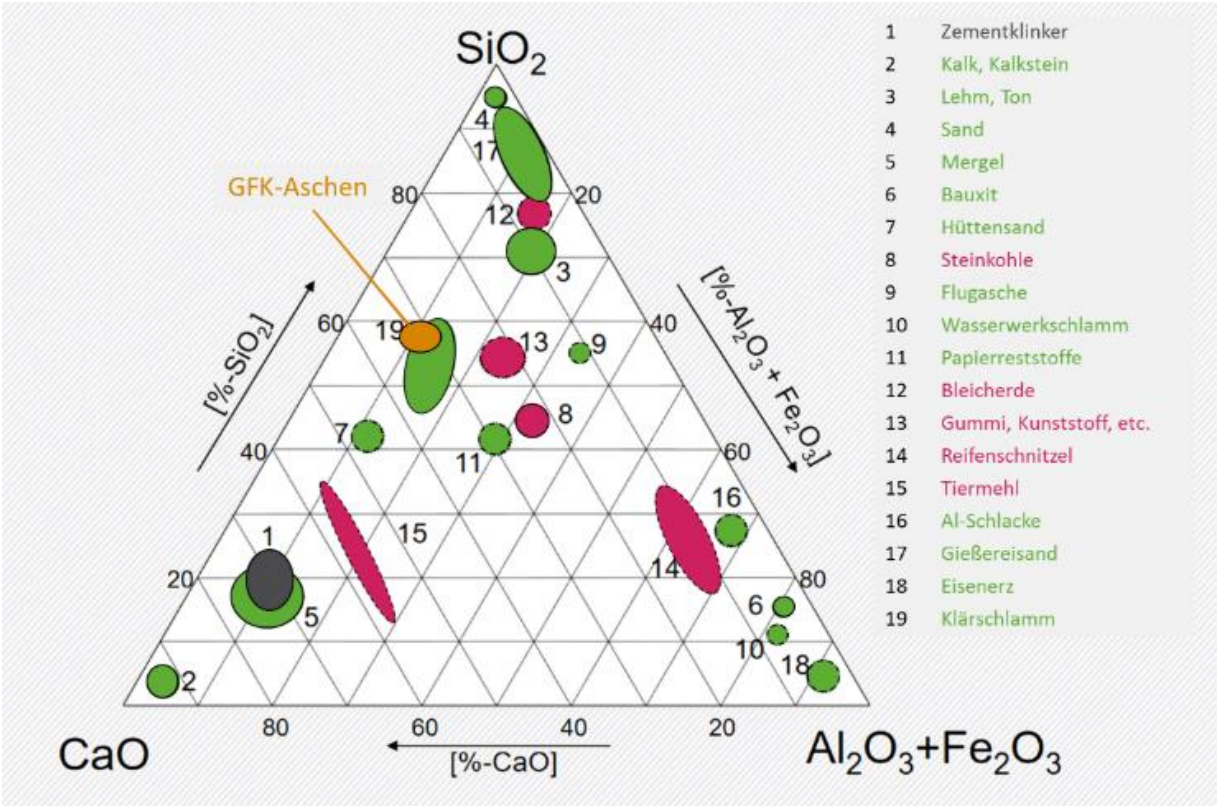
Tertiärluft wird als Verbrennungsluft im Kalzinator benötigt, die am Ofenkopf abgezweigt und mittels der Tertiärluftleitung im Bypass am Drehrohr vorbei zum Kalzinator geführt wird.

Klinkerkühler

Im Klinkerkühler erfolgt eine rasche Abkühlung des heißen Klinkers mit Luft, um die Klinkerphase zu stabilisieren, wobei moderne Klinkerkühler quer zum Klinkerstrom mit Luft durchströmt werden. Die rekuperierte Wärme gelangt durch den Ofenkopf in den Drehrohrofen bzw. wird teils als Tertiärluft für den Kalzinator abgezweigt. Der Klinker wird im Klinkerkühler über Schubroste oder sonstige Einbauten zum Brecher transportiert.

Im Zementwerk Lägerdorf der Firma Holcim wird im Gegensatz zu anderen Zementwerken als einer der Hauptrohstoffe hochreine Kreide eingesetzt, die im Wesentlichen aus Kalkstein besteht (Abbildung 162, Nummer 2). Daher werden v. a. SiO_2-haltige und Al_2O_3+Fe_2O_3-haltige Korrekturstoffe benötigt, um den Zementklinker (Nummer 1) in der gewünschten Zusammensetzung, mit etwa 70 % CaO, 20 % SiO_2 und 10 % Al_2O_3+Fe_2O_3 herstellen zu können. Dazu wird allgemein Sand (Nummer 4) als SiO_2-haltiges Material eingesetzt, das teilweise durch GFK-Aschen substituiert werden kann, da diese Aschen aus etwa 60 % SiO_2, 10 % Al_2O_3+Fe_2O_3 und 30 % aus CaO bestehen (Freiburg 2017).

Abbildung 162: Zusammensetzung relevanter Rohstoffe, Energieträger sowie des Zementklinkers bei der Zementherstellung. Zusätzlich eingetragen ist die Zusammensetzung von GFK-Aschen.



Quelle: Eigene Darstellung, KIT-ITC, mit Änderungen nach Freiburg (2017).

Die Aufbereitung der GFK-Abfälle erfolgt bei der Firma Neocomp in Bremen, die im letzten Zerkleinerungsschritt dem GFK-Abfallstrom etwa 50 Gew.-% Spuckstoffe aus der Papierindustrie zumischt. Die Aufgabe des so aufbereiteten Materialmixes erfolgt im Zementwerk Lägerdorf entsprechend Abbildung 160 in den Kalzinator. Das Zementwerk Lägerdorf verfügt für den Einsatz von stückigen Ersatzbrennstoffen mit niedrigem Heizwert über eine sogenannte Vorbrennkammer (PrePol SC) (Anhang A.4), wo alternativ eine Zugabe von GFK-Abfällen erfolgen könnte, was bisher noch nicht realisiert wurde.

Die Zugabe der aufbereiteten GFK-haltigen Abfälle erfolgt in den Kalzinator, der mit einer WS-Feuerung betrieben wird. Hierbei brennt die GFK-Matrix ab, die GF werden freigelegt und liegen als GFK-Aschen vor, die im Drehrohrofen mit den Roh- und Korrekturstoffen zum Zementklinker reagieren (Eyerer et al. 2020).

Dabei können jährlich bis zu 40.000 t an aufbereiteten GFK-Abfällen im Zementwerk Lägerdorf der Firma Holcim (Deutschland) GmbH verwertet werden (Holcim GmbH 2018), wobei die jährliche Produktion an Zementklinker im Zementwerk Lägerdorf bei ca. 1,3 Mio. t liegt (Freiburg 2017).

Für die Einsatzstoffe in Zementwerken liegen strenge Anforderungen vor (Zeschmar-Lahr et al. 2020) und für diese gilt:

- Eine negative Beeinflussung des Betriebs darf durch Zusatzstoffe nicht auftreten, wie z. B. eine Ansatzbildung oder Verstopfungen, weshalb beispielsweise Feuchte, Aschegehalt, Schwefelgehalt, Gehalte an Alkalien und Halogenen sowie der Heizwert kontrolliert werden.

- Die Zugabe der Zusatzstoffe darf zu keiner negativen Beeinflussung der Produktqualität führen.
- Die Zugabe der Zusatzstoffe darf zu keiner Überschreitung der zulässigen Emissionsgrenzwerte führen.
- Die Zugabe der Zusatzstoffe darf zu keiner Gefährdung der Sicherheit und Gesundheit der Beschäftigten durch Eigenschaften der Materialien führen, weshalb z. B. Flammpunkt, pH-Wert, Gehalte an Schwermetallen oder organischen Stoffen (z. B. PCB, PAK, Pestizide) überwacht werden.

Diese Anforderungen an den aufbereiteten GFK-haltigen Abfallstrom bedingen unter anderem eine Zerkleinerung auf < 40 mm. Zur Erzeugung einer verwertbaren Mischung wird dem aufbereiteten GFK-Abfallstrom ein zweiter, feuchter Stoffstrom zur Homogenisierung, Staubreduktion und Heizwerteinstellung beigemischt. Hierzu wird bei der Aufbereitung des GFK-haltigen Abfallstroms im Querstromzerspaner bei der Firma Neocomp in Bremen ein feuchter Spuckstoff, ein Abfallprodukt der Papierindustrie, im Massenverhältnis 1:1 beigemischt (Lange 2020; Eyerer et al. 2020).

Zur Verwertung des so aufbereiteten GFK-haltigen Abfallstroms müssen Konzentrationen an bestimmten Störstoffen, wie zum Beispiel von Boroxid, berücksichtigt werden, das hauptsächlich in E-GF vorhanden ist und die Aushärtezeit des Zements negativ beeinflussen kann. Der maximale Anteil an Boroxid im Zement ist laut Pickering (2006) auf 0,2 % begrenzt, sodass nur eine begrenzte Menge der Korrekturstoffe durch den aufbereiteten GFK-Abfallstrom substituiert werden kann.

Neben der rohstofflichen Verwertung der GF wird die Kunststoffmatrix energetisch verwertet, wobei pro Tonne Rotorblattmaterial etwa 500 kg Steinkohle substituiert werden können (Eyerer et al. 2020). Dabei könnten bis zu 16 % der CO_2-equivalenten Emissionen eingespart werden, wenn 75 % des Brennstoffes Kohle mit GFK substituiert werden kann, wobei auch Transportstrecken zu berücksichtigen sind (European Composites Industry Association).

Die Verwertung von GFK-haltigen Abfällen im Zementwerk ist etabliert und mit einem TRL von 9 bewertet (Bennet 2021). Dabei ist zu beachten, dass diese Verwertungsroute deutschlandweit nur in einem Zementwerk umgesetzt wird und somit die GFK-Entsorgungskapazität auf 40.000 t/a begrenzt ist.

Im LAGA-Abschlussbericht wird angeregt für eine langfristige Entsorgungssicherheit alternative Prozesse zu entwickeln und zu etablieren (Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) 2019).

6.3.2.3 Zusammenfassung und Beurteilung der Prozesse zur Nutzung der Glasfaser als Rohstoff

Der Einsatz von aufbereiteten GFK-Abfällen bei der Zementklinkerherstellung im Zementwerk stellt aktuell den einzig kommerziell etablierten Prozess zur Verwertung dieses FVW dar. Die angegebene Jahreskapazität sollte ausreichen, um die aus Rotorblattabfällen aktuell anfallende und prognostizierte Abfallmenge an GFK zu verwerten.

Die Prozesskette ist vom Rückbau der WEA mit Demontage der Rotorblätter vor Ort und Aufbereitung des GFK-Abfallstroms entsprechend den Anforderungen des Zementwerkes bis hin zu deren Verwertung im Drehrohrofen inkl. notwendiger Transporte etabliert.

Weiterhin können durch den Einsatz von GFK, wie auch für Ersatzroh- und -brennstoffe, bei der Zementklinkerherstellung CO_2-äquivalente Emissionen reduziert werden. Da es sich hierbei aktuell um die einzig kommerziell etabilierte Prozessroute zur GFK-Verwertung handelt, sollte

diese unter Berücksichtigung gesetzlicher Regelungen weiterverfolgt werden. Zu bemerken ist, dass die Zementindustrie bezogen auf die verschiedenen Industriesektoren in Deutschland über die drittgrößte CO_2-äquivalente Emission verfügt (Deutsche Emissionshandelsstelle im Umweltbundesamt 2021). Andere Recyclingprozesse, beispielsweise zum Erhalt des Werkstoffes GF, sind aktuell nicht wirtschaftlich betreibbar und oft mit einer Reduktion der Faserqualität verbunden, sodass ein „Downcycling“ meist unausweichlich ist.

Berücksichtigt werden muss, dass deutschlandweit aktuell nur eine Firma GFK-Abfälle aufbereitet und diese auch nur in einem Zementwerk verwertet werden. Eine Etablierung von alternativen Prozessen wird deshalb als sinnvoll erachtet, und entsprechende Forschungsvorhaben zur Entwicklung und Optimierung alternativer Prozesse sollten gefördert werden. Die LAGA gibt hierzu in ihrem Abschlussbericht an, dass eine langfristige Entsorgungssicherheit von GFK-Abfällen nicht von der Zementproduktion alleine abhängig sein sollte und alternative Verwertungsverfahren zu etablieren sind (Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) 2019).

6.3.3 Prozesse der sonstigen GFK-Verwertung

6.3.3.1 Energetische Verwertung

Als sonstiger Prozess der GFK-Verwertung kommt die energetische Verwertung in Frage, wozu keine verlässlichen Angaben zu entsorgten Abfallströmen in Deutschland vorliegen. Für die energetische Verwertung der Matrix als Ersatzbrennstoff kommen Hausmüllverbrennungsanlagen, Sonderabfallverbrennungsanlagen oder Heizkraftwerke nur dann in Frage, wenn ein vollständiger Ausbrand sichergestellt werden kann. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die schmelzbaren GF wegen einer Verglasung des Brennraums zu Betriebsproblemen in verschiedenen Anlagenteilen führen können und somit die einsetzbaren Mengen begrenzt sind. Weiterhin ist die notwendige Aufbereitung der GFK-haltigen Abfallströme kostenintensiv, sodass diese Route, beispielsweise gegenüber dem Einsatz bei der Zementklinkerherstellung, als weniger geeignet angesehen wird (Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) 2019).

6.3.4 Prozesse der Beseitigung

Trockene, nicht in einer Kunststoffmatrix gebundene GF-Abfälle können deponiert werden, wobei dies eine günstige Entsorgungsvariante darstellt, jedoch den Zielen des KrWG entgegensteht. Eine Deponierung oder eine Verwertung als Deponieersatzbaustoff ist für GFK aufgrund des hohen Brennwertes der Kunststoffmatrix ausgeschlossen (Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) 2019).

6.4 Verwertung von carbonfaserverstärkten Kunststoffen (CFK)

CF zeichnen sich durch sehr gute physikalische Eigenschaften aus, die durch Variation des Ausgangsmaterials sowie der Parameter beim Herstellungsprozess gezielt auf Anforderungen der vorgesehenen Anwendung eingestellt werden können. Die Herstellung von CF ist sehr energie- und kostenintensiv, sodass eine Reduktion von CF-Abfällen über den gesamten Herstellungs- und Verarbeitungsprozess angestrebt werden soll.

Der Stand zum Umgang mit CF-haltigen Abfällen in Deutschland wurde von der LAGA in ihrem 2019 erschienenen Bericht zur „Entsorgung faserhaltiger Abfälle“ betrachtet. Dem Bericht zufolge spielen bei den CF- bzw.CFK-haltigen Abfallströme die End-of-Life (EoL)-Mengen aktuell noch eine untergeordnete Rolle, eine Zunahme wird allerdings erwartet. Insbesondere die EoL-Abfallströme fallen meist als Gemische an, für die keine ausreichenden Kenntnisse über

Mengenanteile der in den Abfallfraktionen enthaltenen CF vorliegen. Die aus der aktuellen Situation abgeleiteten Handlungsempfehlungen umfassen u. a. Forschung zu Sicherheit, Umweltschutz und zu technischen Lösungen. Weiterhin wird eine Kennzeichnung dieser Abfallströme als sinnvoll erachtet, die Vergabe eines separaten Abfallschlüssels für solche Stoffströme als notwendig angesehen und eine Getrennthaltung und separate Erfassung dieser Abfallströme empfohlen (Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) 2019).

Ein Überblick zum aktuellen Stand der Verwertung CF-haltiger Abfälle beim Rückbau von WEA ist in der vom Umweltbundesamt beauftragten Studie zur Entwicklung eines Konzepts und Maßnahmen für einen ressourcensichernden Rückbau von Windenergieanlagen enthalten, wobei dort festgehalten wird, dass es aktuell keine etablierten Verwertungswege für diesen Stoffstrom gibt (Zotz et al. 2019).

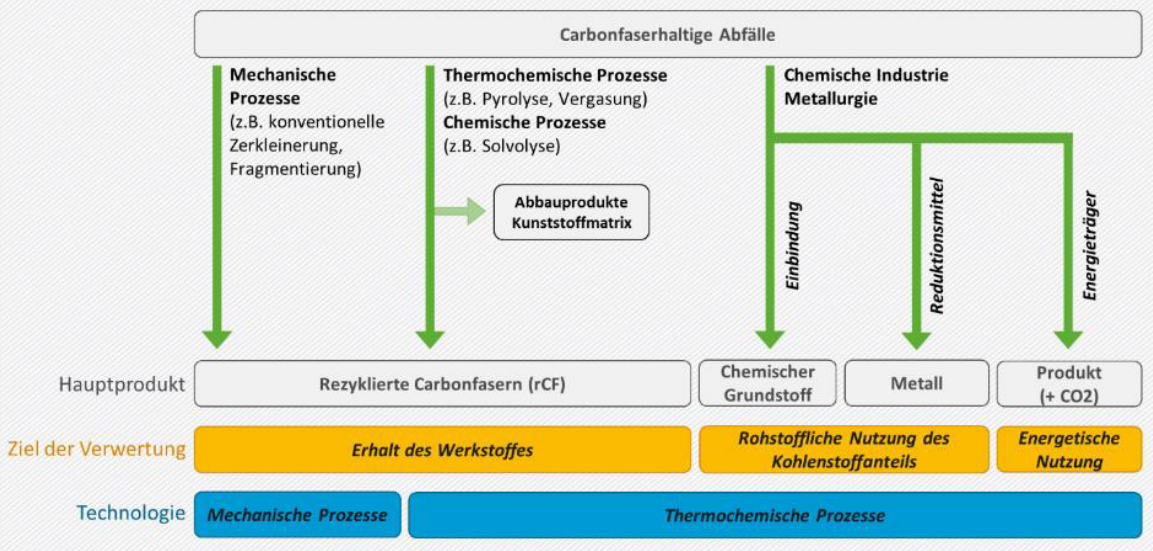
Eine Lagerung von Rotorblättern als Ersatzteile für eine Weiter- bzw. Wiederverwendung würde in der Abfallhicharchie Stufe 2 – Vorbereitung zur Wiederverwendung – entsprechen. Zu klären sind hierbei rechtliche Belange, da es sich nach dem Rückbau einer WEA auch bei den Rotorblättern um einen Abfallstrom handelt, und entsprechende rechtliche Vorgaben zu berücksichtigen sind. Aus abfallrechtlicher Sicht gehört auch die Vorbereitung zur Wiederverwendung zur Abfallverwertung, und nach Angaben der LAGA findet diese in Deutschland für CF-haltige Abfälle nicht statt (Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) 2019).

Eine Weiterverwendung von CF-haltigen Abfällen speziell aus Rotorblättern strebt die Firma Carbon-Werke Weißgerber GmbH & Co. KG (Wallerstein) an. Hierbei sollen die CFK-Gurte mechanisch von den sonstigen Materialien des Rotorblatts getrennt werden, um diese nach weiterer mechanischen Aufbereitung in verschiedenen Industrieanwendungen einzusetzen, beispielsweise in der Medizintechnik oder der Bautechnik (Weißgerber und Pinakattu 2020; Pinakattu und Weißgerber 2021). Aus genehmigungsrechtlichen Gründen kann die Firma Carbon-Werke Weißgerber GmbH & Co. KG bisher keine Rotorblattabfälle im größeren Umfang annehmen und verarbeiten (Weißgerber und Pinakattu 2020). In verschiedenen Vorprojekten wurden Prototypen aus CFK-Teilen eines Rotorblatts hergestellt, zum Beispiel für Kunstwerke oder Stützen für morsche Bäume im Augsburger Stadtwald (Heine und Detter 2020). Aktuell liegen hierzu keine weiterführenden Informationen zu eingesetzten Techniken bzw. Prozessen der Abtrennung und Aufbereitung der Rotorblatt CFK-Gurte vor, sodass hierzu eine weiterführende Betrachtung und technische Beurteilung nicht möglich sind.

Sowohl im Projekt CarboBreak, als auch im Projet Carbon Fibre Cycle (CFC), wird unter anderem die Freisetzung von kritischen Faserbruchstücken bei der mechanischen Bearbeitung von CFK-Bauteilen untersucht, wobei die Ergebnisse dieser Untersuchungen künftig bei Bearbeitungsprozessen zu beachten sind.

Die verschiedenen Verfahren zur Verwertung CF-haltiger Abfälle, die bisher eingesetzt werden oder deren Eignung geprüft wird, sind Gegenstand der Forschung und können entsprechend dem Hauptprodukt des Prozesses eingeteilt werden (Abbildung 163). So ist beispielsweise das Hauptprodukt der Pyrolyse eine rezyklierte CF (rCF). Die Technologie der Pyrolyse ist den thermochemischen Prozessen zuzuordnen, wozu auch metallurgische Prozesse sowie viele Prozesse der chemischen Industrie gehören. Bei den beiden letztgenannten Prozessen werden die CF, die definitionsgemäß einen hohen Kohlenstoffanteil von mehr als 92 % aufweisen (Morgan 2005), als Rohstoff genutzt, und dienen beispielsweise als Reduktionsmittel oder werden chemisch in das Endprodukt eingebunden.

Abbildung 163: Übersicht zu potentiellen Verfahrensrouten der Verwertung CF-haltiger Abfälle inkl. der jeweils entstehenden Hauptprodukte sowie der abfallrechtlichen und technologischen Einordnung.



Quelle: Eigene Darstellung, KIT-ITC, mit Änderungen nach Wexler et al. (2021).

6.4.1 Prozesse zum Recycling von CFK

Die verschiedenen Prozesse zur CFK-Verwertung mit dem Ziel des Erhalts dieses Werk- bzw. Wertstoffes werden in den folgenden Kapiteln vorgestellt, mit Fokus auf einer möglichst vollständigen technischen Beschreibbarkeit des betrachteten Prozesses. Weiterhin erfolgt eine Betrachtung der potentiellen Einsatzmöglichkeiten rezyklierter CF sowie eine Zusammenfassung der Ergebnisse, bei der auch rechtliche Rahmenbedingungen ausgeführt und der weiterführende Forschungsbedarf dargelegt werden.

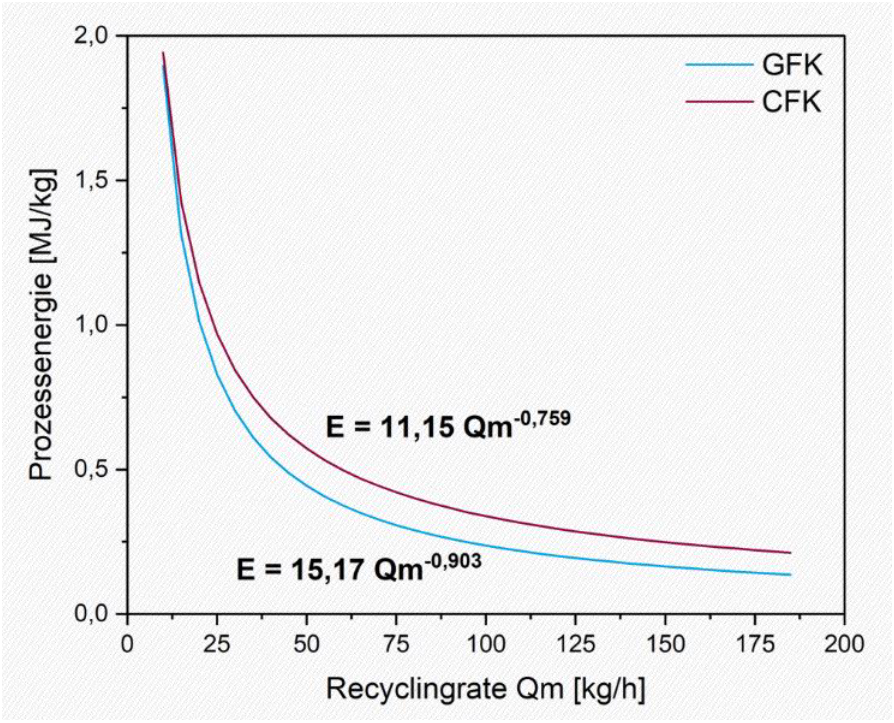
6.4.1.1 Prozesse zur mechanischen Zerkleinerung von CFK

Derzeit ist kein rein mechanisches Zerkleinerungsverfahren bekannt, welches CFK im industriellen Maßstab verwerten kann. Dieser Prozess dient als Vorbehandlung für eine weiterführende Verwertung, die auf eine Separierung von Fasern und Matrix abzielt, sodass die Fasern ohne Matrix-Kontamination als Verstärkung in neue Komposite eingesetzt werden können (Oliveux et al. 2015).

Der TRL-Level der mechanischen Zerkleinerung von CFK kann auf 6 bis 7 abgeschätzt werden (Ierides und Reiland 2019; Bennet 2021), da meist handelsübliche Zerkleinerungsapparate eingesetzt werden können, die jedoch auf CFK-spezifische Anforderungen angepasst werden müssen, beispielsweise eine Vermeidung einer Staubfreisetzung oder Anpassung der Apparate wegen des erhöhten Verschleißes beim CFK-Einsatz.

Untersuchungen zum Energiebedarf bei der mechanischen Zerkleinerung von GFK (Shuaib und Mativenga 2016b) und von CFK (Howarth et al. 2014) in einem Zerkleinerungsapparat mit einer maximalen Verarbeitungskapazität von 150 kg/h zeigen, dass der Energiebedarf mit steigendem Durchsatz abnimmt und für CFK aufgrund der höheren spezifischen Zerkleinerungsenergie leicht höhere Werte als für GFK vorliegen (Abbildung 164). Dabei ist die spezifische Zerkleinerungsenergie unter anderem abhängig vom Faservolumenanteil und der Faserorientierung innerhalb des Verbundwerkstoffs.

Abbildung 164: Spezifischer Energiebedarf beim mechanischen Recycling von GFK und CFK in Abhängigkeit der Recyclingrate.



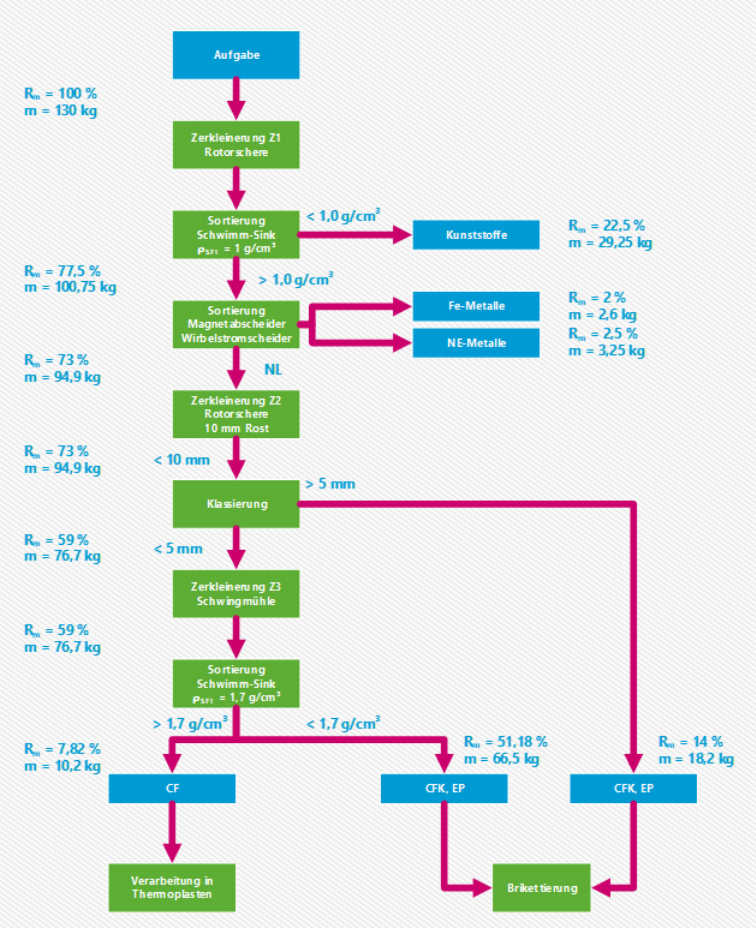
Quelle: Eigene Darstellung, KIT-ITC, nach Shuaib und Mativenga (2016b).

Nachteile der mechanischen CFK-Zerkleinerung sind einerseits eine mögliche Bildung von lungengängigen Faserbruchstücken, andererseits werden die Eigenschaften (Faserkürzung) der wiedergewonnenen Fasern verschlechtert (Morin et al. 2012). Zudem stellen die erhöhten Betriebskosten aufgrund eines Werkzeugverschleißes die Rentabilität dieses Verfahrens in Frage (Zhang et al. 2020), weshalb derzeit die mechanische Zerkleinerung von Verbundwerkstoffen, vor allem CFK, meist nur als Vorbehandlung für andere Recyclingmethoden stattfindet (Gopalraj und Kärki 2020).

In einem von der deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) geförderten Projekt „CarbonRevive“ (Konzeption und Pilotierung eines Verfahrens zur vollständigen stofflichen Verwertung kohlenstofffaserhaltiger Abfälle) der TU Freiberg (Hamann 2020) wurde ein Recyclingprozess für CFK-haltige Abfälle entwickelt (Abbildung 165), wobei im Vergleich zum herkömmlichen Partikelrecycling eine nass-mechanische Zerkleinerung in mehreren Stufen zum Einsatz kommt, um im Vergleich zum Trockenverfahren eine Freisetzung von Fasern und Stäuben in die Umwelt zu vermeiden. Dabei wurden in einem Pilotversuch 130 kg CFK-Produktionsabfall eines Automobilherstellers, das in einem Schredder vorzerkleinert wurde, zunächst in einer berieselten Vierwellen-Rotorschere auf eine Größe von kleiner 60 mm zerkleinert (Zerkleinerung 1). In einer nachfolgenden Schwimm-Sink-Analyse erfolgte die Abtrennung von Kunststoffkomponenten und in einem Magnetabscheider sowie einem Wirbelstromabscheider die Abtrennung von Eisen- und NE-Metallen. Die von Störstoffen befreite CFK-Epoxidharz-Fraktion wurde anschließend in einer Zweiwellen-Rotorschere auf eine Größe kleiner 10 mm (Zerkleinerung 2) zerkleinert und in einer anschließenden Klassierung eine CFK-Epoxidharz-Fraktion größer 5 mm abgetrennt. Die von Störstoffen befreite CFK-Epoxidharz-Fraktion kleiner 5 mm wurde anschließend mittels einer Schwingmühle feinzerkleinert (Zerkleinerung 3), was einen Faseraufschluss bewirkte. In einer vierstufigen Dichtesortierung mittels Hydrozyklone erfolgte eine Trennung in ein CF-reiches Produkt mit einer Reinheit von 82 % (CF-Anteil) und

einer CF-Epoxidharz-Mischfraktion mit einem CF-Anteil von 56,5 %. Das verwendete Prozesswasser wurde mittels Filterkammerpressen gereinigt und im Kreislauf geführt.

Abbildung 165: Verfahrensfließbild und Massenbilanz aus dem Pilotversuch des entwickelten nass-mechanischen Verfahrens.



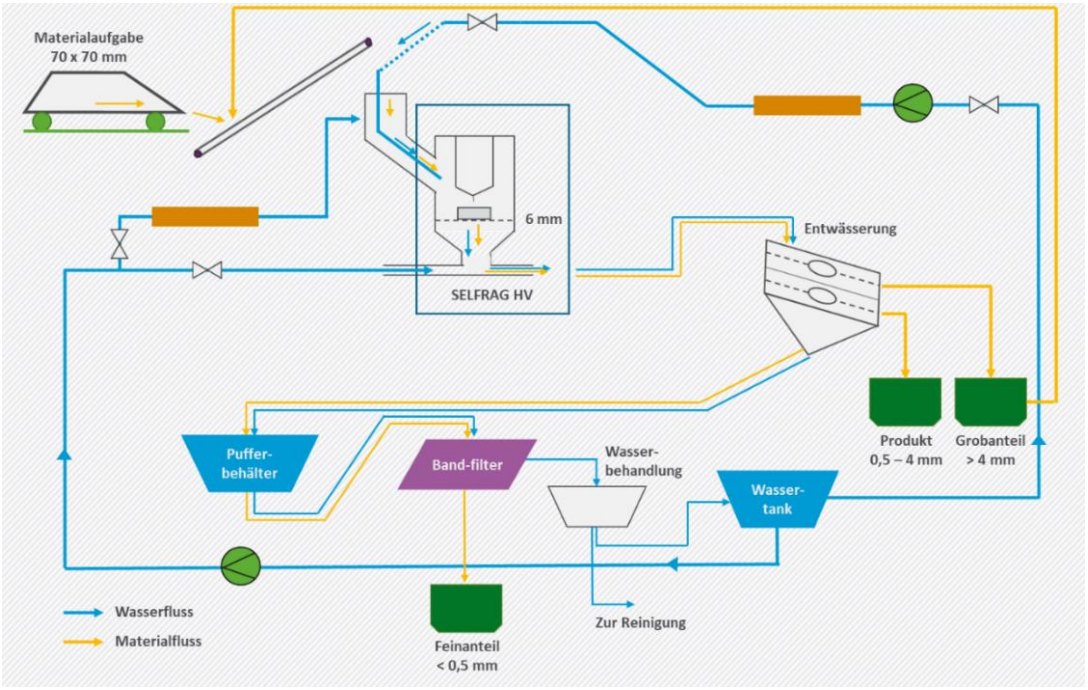
Quelle: Eigene Darstellung, KIT-ITC, nach Kramer et al. .

6.4.1.2 Trennung des Materialverbundes mittels HF-Fragmentierung

Eine Prozessbeschreibung zur HV-Fragmentierung ist in Kapitel 6.2.1.2 enthalten. Dieses Verfahren wird in den letzten Jahren auch verstärkt zur Verwertung von FVW untersucht, jedoch bisher ausschließlich im Labormaßstab. Solche Anlagen sind kommerziell von der Firma SELFRAG AG (Kerzers, Schweiz) erhältlich. Neben EDF-Laboranlagen baut SELFRAG auch EDF-Pilotanlagen mit TRL 6, wobei eine solche Anlage 2015 erfolgreich in Betrieb genommen wurde (Weh 2015a). Ein derartige Anlage ist für die Behandlung von CFK-Teilen kleiner 60 mm sowie eine weitere Anlage zur Behandlung größerer CFK-Bauteile (Abbildung 167) geeignet (Weh 2015a). Hauptkomponenten der Anlagen sind die HV-Erzeugung, die Prozesszone einschließlich Materialhandhabung für die Ein- und Ausgangsströme, eine Entwässerung mit Materialrückgewinnung sowie eine Wasserkreislaufbehandlung. Die Anlage benötigt bei einem Durchsatz von 5,65 kg/h einen Energiebedarf von 1,2 kWh/kg, bei einer Recyclingquote von über 60 %. Die Materialfestigkeit der so erzielten rCF soll nur gering gegenüber Neufasern reduziert sein und soll sich durch Erhöhung der Pulsrate und einem höheren Materialdurchsatz optimieren lassen. Im Vergleich zu anderen CFK-Recyclingverfahren sollen die Materialkennwerte des rCF weitgehend erhalten bleiben, und die CFK-Verwertung mit einem

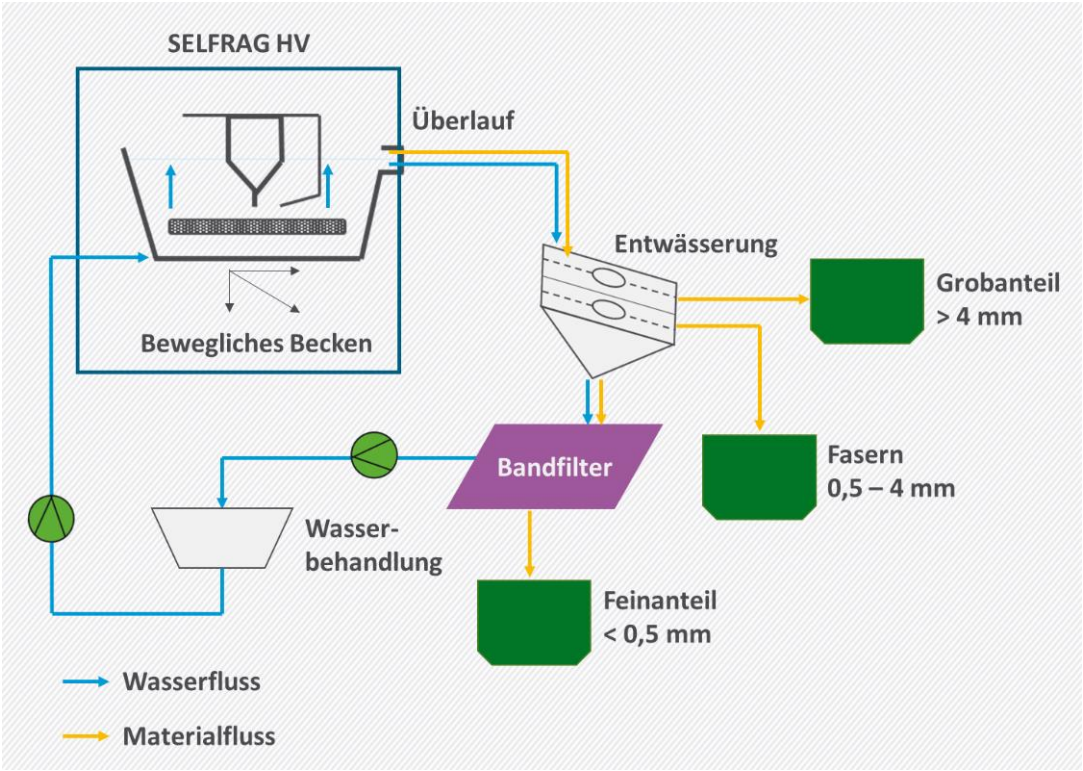
geringen Energiebedarf durchführbar sein (Weh 2015a). Auch an anderer Stelle wird der TRL dieser Fragmentierung für CFK mit 6 abgeschätzt (Ierides und Reiland 2019).

Abbildung 166: Flussdiagramm der Aufbereitung von CFK-Teilen < 70 mm mittels Hochvolt-Fragmentierung nach dem SELFRAG-Prozess.



Quelle: Eigene Darstellung, KIT-ITC, nach Weh (2015b).

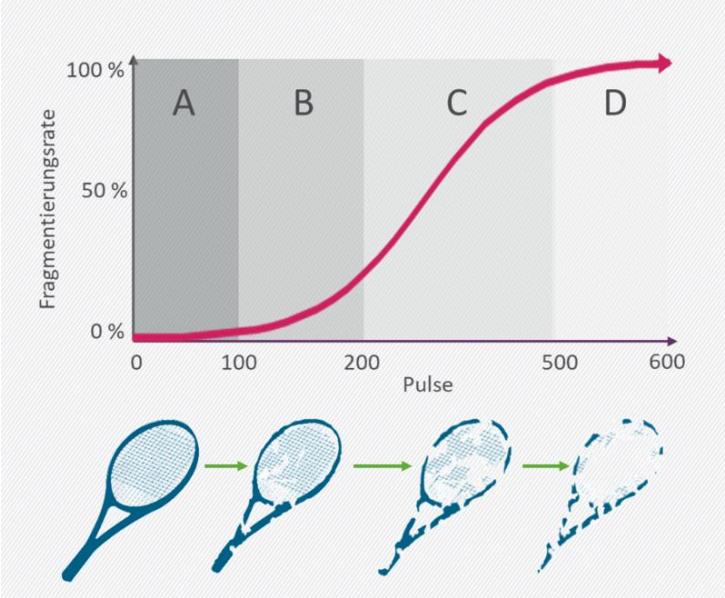
Abbildung 167: Flussdiagramm der Aufbereitung von CFK-Teilen ≥ 60 mm mittels Hochvolt-Fragmentierung nach dem SELFRAG-Prozess.



Quelle: Eigene Darstellung, KIT-ITC, nach Weh (2015b).

Das Fragmentierungsverhalten von beispielsweise CFK-Türscharnieren wurde in Abhängigkeit der Pulszahl in einer SELFRAG-Laboranlage untersucht (Roux et al. 2017), wobei der zeitliche Verlauf der Fragmentierung und die damit einhergehende Faserrückgewinnung ermittelt wurde (Abbildung 168). Zu Beginn der Fragmentierung (Phase A) wird das Objekt nur an den Kanten angegriffen und Risse erzeugt, welche sich in Phase B ausbreiten und zur Fragmentierung des gesamten Bauteils in Phase C führen. Das anfallende Material wird bei diesen Untersuchungen jeweils nach 100 Pulsen entfernt und gesiebt, sodass in der Endphase (Phase D) nur noch wenige Bruchstücke vorliegen. Bei geringer Menge an verbleibendem Material nimmt jedoch die Effizienz des Prozesses stark ab, weshalb die Untersuchungen kurz vor der Endphase abgebrochen wurden und etwa 60 Gew.-% des ursprünglichen Materials zu den angestrebten rCF fragmentiert werden konnten. Die restlichen Fraktionen setzen sich aus Pulver (20 %), nicht-fragmentierten Reststücken (6 %) sowie Materialverlusten bei der Siebung (13 %) zusammen. Aus dem rückgewonnenen Fasermaterial wurden sekundäre Türscharniere hergestellt, welche im Vergleich zum Originalprodukt eine Reduzierung der mechanischen Eigenschaften von etwa 17 % aufwiesen (Roux et al. 2017).

Abbildung 168: Qualitativer, zeitlicher Verlauf der Rückgewinnung von CFK-Material in Abhängigkeit der aufgegebenen elektrischen Pulse mit den Phasen A (Schwächungsphase), B (Rissausbreitung), C (Fragmentierung) und D (Endphase).



Quelle: Eigene Darstellung, KIT-ITC, nach Roux et al. (2013).

Die bisher beschriebenen Untersuchungen wurden mittels elektrodynamischer Fragmentierung (EDF) durchgeführt, wo der Hochspannungsdurchschlag in dem zu fragmentierenden Material stattfindet. Bei der elektrohydraulischen Fragmentierung (EHF) findet der Spannungsdurchschlag im Arbeitsmedium statt. Solche Untersuchungen wurden mit CFK an der TU Bergakademie Freiberg im Institut für Maschinenbau und später im Institut für Aufbereitungsmaschinen in der Arbeitsgruppe Recyclingmaschinen durchgeführt (Orzol et al. 2017). Bei EHF ist die Arbeitsspannung mit 30 bis 45 kV wesentlich geringer als bei EDF. Die Hochspannung wird durch mehrere in Reihe geschalteter Kondensatoren bereitgestellt und über zwei Elektroden im Arbeitsmedium schlagartig entladen. Damit der Spannungsdurchbruch im Arbeitsmedium und nicht im zu fragmentierenden Material stattfindet, wird eine hohe Impulsanstiegszeit im Bereich von etwa 500 ns benötigt, da bei solch schnellen Pulsanstiegen

die Durchschlagfestigkeit des Arbeitsmediums unterhalb derjenigen von Festkörpern liegt. Der Energieeintrag pro Impuls beträgt hierbei ca. 600 J.

Zwischen den Elektroden bildet sich im Arbeitsmedium durch den Spannungsdurchschlag ein unter hohem Druck expandierender Plasmakanal aus, wodurch eine Schockwelle im Reaktor hervorgerufen wird. Dabei treten in der Nähe des Plasmakanals Drücke von einigen tausend bar auf und durch diese Druckwellen wird das sich darin befindliche Material fragmentiert. Die Untersuchungen erfolgten mit einer Anlage der Firma ImpulsTec GmbH im Rahmen des Forschungsprojekts ReLei, das von BMBF gefördert wurde. Die Untersuchungen erfolgten mit reinen CF, reiner Matrix sowie CFK-Proben, die mittels EHF in Wasser fragmentiert wurden. Die Fragmentierung reiner CF-Proben haben eine Faserkürzung in Abhängigkeit der Pulsanzahl gezeigt, sodass Fasern kontinuierlich aus dem Prozess ausgeschleust werden sollten, um deren Qualtität nicht weiter zu mindern. Auch die reine Matrix wurde fragmentiert, was bei einem kontinuierlichen Prozess zur CFK-Verwertung zu berücksichtigen ist. CFK-Proben mit 15 g konnten mit 500 Impulsen nahezu vollständig fragmentiert werden, was unter den Laborbedingungen einem Energieverbrauch von ca. 5,6 kWh/kg_{CFK} entspricht.

6.4.1.3 Recycling mittels Pyrolyse

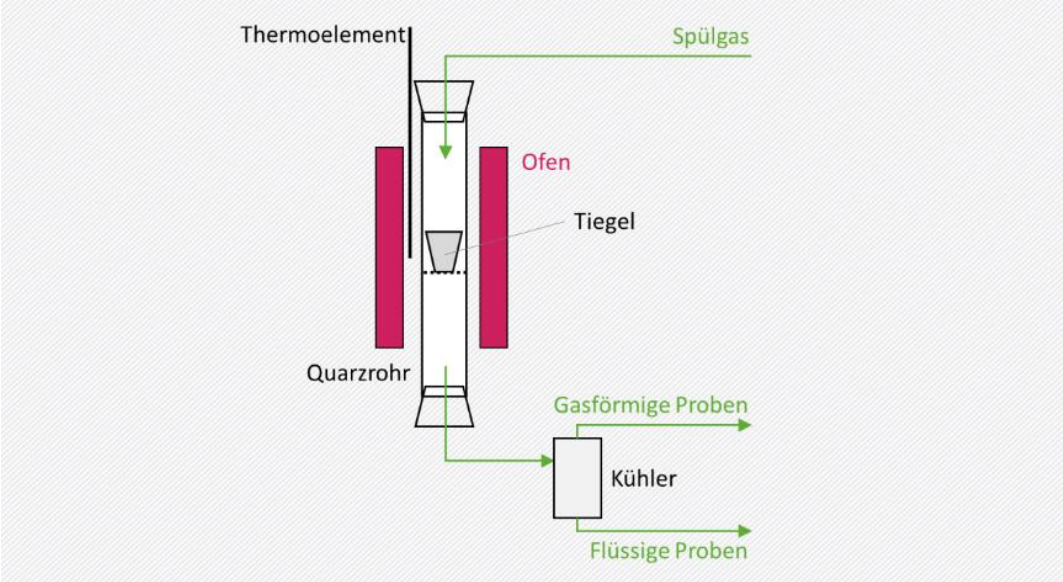
Die Verfahren der CFK-Pyrolyse können nach Art des Energieeintrags und weiterhin nach der Pyrolysetechnik, mit oder ohne Beteiligung eines Katalysators, unterteilt werden.

6.4.1.3.1 Konventionelle Pyrolyse

Das grundlegende Pyrolyseverhalten einer Kunststoffmatrix und die Auswirkungen auf die freigelegten rCF werden meist mittels thermogravimetrischer Analyse (TGA) bestimmt, wobei die Probenmenge oft nur wenige Mikrogramm beträgt. Vorteil dieser Methode ist, dass die Proben- und Prozessparameter genau definiert sind, sodass Einflüsse der Atmosphärenzusammensetzung, Aufheizrate, Pyrolysetemperatur oder Behandlungsdauer auf das Abbauverhalten der Matrix und die Eigenschaften der Fasern untersucht werden können (Kim et al. 2017; Limburg et al. 2019; Oliveux et al. 2015; Lee et al. 2013; Tadini et al. 2017; Adler et al. 2021). Auf eine vertiefende Darstellung der Literatur zur TGA von CFK wird an dieser Stelle verzichtet, da eine Übertragbarkeit der Ergebnisse auf das Verhalten CF-haltiger Abfallströme in realen Prozessen nur sehr bedingt möglich ist.

Untersuchungen zum Einfluss geringer Konzentrationen an Sauerstoff auf die Pyrolyse und die resultierenden Eigenschaften erzeugter rCF wurden zum Beispiel in einem elektrisch beheizten Festbettreaktor im Labormaßstab untersucht (Abbildung 169), wobei die Probenmengen im Bereich weniger Gramm lagen. Die dabei eingesetzten CFK-Materialien waren auf Basis einer PAN-basierten CF und einem Epoxidharz. Die Proben wurden bei verschiedenen Temperaturen im Bereich von 550 bis 650 °C in verschiedenen Gasatmosphären (N_2, 5 % O_2 in N_2, 10 % O_2 in N_2, Luft) für 15 bis 60 min behandelt. Dabei zeigte sich, dass die Reduktion der mechanischen Fasereigenschaften maßgeblich vom Sauerstoffgehalt der Atmosphäre, aber auch von der Behandlungsdauer abhängt. Weiterhin wurde durch die Behandlung der Sauerstoffgehalt an der Faseroberfläche vergrößert, hauptsächlich in Form von Carboxy-, Hydroxy- und Carbonylgruppen, wobei der Sauerstoffgehalt die wesentliche Einflussgröße war (Yang et al. 2015).

Abbildung 169: Schematische Darstellung des Festbettreaktors zur Einflussbestimmung diverser Parameter bei der Pyrolyse von CFK im Labormaßstab.



Quelle: Eigene Darstellung und Übersetzung, KIT-ITC, nach Yang et al. (2015).

In einer weiteren Laboruntersuchung wurden PAN-basierte CF mit Epoxidmatrix in einem horizontal angeordneten Rohrreaktor in CO_2 bei einer Heizrate von 5 K/min auf eine Endtemperatur bis 400 °C pyrolysiert. Koksreste wurden nachfolgend in H_20-Dampf entfernt, wobei die Temperatur mit 5 K/min auf 700 °C erhöht und diese Temperatur für 20 bis 100 min gehalten wurde. Diese zweistufige Prozessführung soll eine Reduktion der Pyrolysedauer und somit eine Energie- und Kostenoptimierung bewirken. Bei den Untersuchungen zeigte sich, dass mit steigender Behandlungsdauer mit Wasserdampf der Faserdurchmesser abnahm und bei allen Prozessparametern, v. a. mit steigender Behandlungsdauer, die Zugfestigkeit reduziert wurde, das Elastizitätsmodul sogar um bis zu 2,5 % stieg (Kim et al. 2019).

Weitere Untersuchungen zur Pyrolyse von CFK werden im Technikums- und Pilotmaßstab bei der Firma Pyrum Innovations AG in Dillingen/Saar im Rahmen des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) geförderten „Infinity"-Projekts an einer kontinuierlich betriebenen Pilotanlage durchgeführt. Dieses Projekt (FKZ 03LB3006C) wurde im Januar 2021 aufgenommen, und Projektpartner sind u. a. die Deutschen Institute für Faserforschung Denkendorf (DITF), die Firma Textechno H. Stein GmbH & Co. KG (Mönchengladbach) und das Fraunhofer-Institut für Gießerei-, Composite- und Verarbeitungstechnik (IGCV) in Augsburg. Ziel des Projekts ist die Etablierung eines Kreislaufs für Faserverbundmaterialien mit dem Fokus auf ein Recycling mit einer Reduktion der CO_2-Emission (Pyrum Innovations AG 2021).

Fraunhofer UMSICHT, Institutsteil Sulzbach-Rosenberg, forscht an der „iCycle"-Technologie, die zur Aufbereitung von Schredderrückständen entwickelt wurde. Untersuchungen werden mittlerweile auch mit CF- und GF-haltigen FVW durchgeführt. Die Anlage verfügt über eine Kapazität von bis zu 70 kg/h mit einem kontinuierlich betriebenen Schneckenreaktor. Die Abfälle werden über ein Dosiersystem dem Schneckenreaktor zugeführt, in dem das Inputmaterial pyrolysiert wird. Die entstehenden Pyrolysegase und –öle können energetisch genutzt werden, wobei längerfristig eine Nutzung der Öle als Rohstoff vorgesehen ist, die zunächst mittels Destillation in einzelne Fraktionen (u. a. Phenol, Benzol, Toluol, Styrol) aufgetrennt und nachfolgend polymerisiert werden, um beispielsweise erneut zur Kunststoffherstellung eingesetzt zu werden (Hofmann 2020).

Die konventionelle Pyrolyse stellt aktuell die einzig kommerziell verfügbare großtechnische Lösung zum Recycling CF-verstärkter FVW dar und wird europaweit von vier Firmen mit einer Gesamtkapazität von schätzungsweise 6.000 t/a betrieben. Damit weist dieser Prozess zum CFK-Recycling ein TRL von 9 auf (Bennet 2021; Ierides und Reiland 2019). Dabei gilt allgemein, dass die zur Pyrolyse des CFK benötigte Energie bei etwa 10 bis 15 % der zur Herstellung von vCF aufzubringenden Energie liegt (Witik et al. 2013).

Im norddeutschen Wischhafen wird seit 2001 eine Pyrolyseanlage betrieben, die im Sommer 2020 von ***Mitsubishi Chemical Advanced Materials GmbH (MCAM)*** übernommen wurde. Die in dieser Anlage pyrolysierten und nachfolgend aufbereiteten Produkte werden über „carboNXT“ vertrieben, das ebenfalls seit Sommer 2020 zu MCAM gehört. Die Anlage ist nach 4. BImSchV genehmigt und verarbeitet derzeit jährlich etwa 1.000 t an CF-haltigen Abfällen, wobei eine Erweiterung auf etwa 4.000 t/a geplant ist und zusätzlich das Spektrum der zu behandelnden Abfälle von CFK auf weitere faserhaltige Komposite erweitert werden soll (Rademacker 2021). Der Annahmepreis zur Verwertung CF-haltiger Abfälle ist abhängig vom Material und darin enthaltenen Verunreinigungen und kann auf etwa 400 €/t abgeschätzt werden. Diese Abfälle setzten sich aktuell v. a. aus Prepreg-Materialien und weiteren Produktionsabfällen zusammen, wobei der Anteil an End-of-Life-Abfällen bisher noch bei etwa 10 bis 15 % liegt, mit steigender Tendenz; darunter auch zunehmend Abfälle aus dem Sportbereich (Rademacker 2021).

Die Abfälle werden zunächst zerkleinert und von Störstoffen, wie beispielsweise Metallen, befreit. Der eingesetzte Schredder ist für eine Vorzerkleinerung auch größerer Bauteile speziell für den Einsatz von CF-haltigen FVW ausgerüstet, da v. a. Prepreg-Materialien sonst zu einer Verklebung im Aggregat führen können. Weiterhin sind verschiedene Anlagenteile eingehaust, um eine Freisetzung von Stäuben zu verhindern.

Die Pyrolyse findet in Stickstoff-Atmosphäre bei Temperaturen ab 350 °C und einer Verweilzeit der Materialien im Ofen von etwa 5 bis 20 min statt, wobei die genauen Parameter abhängig von der zu zersetzenden Matrix und dem Faservolumengehalt im Verbund sind. Der Materialtransport findet über einen Förderrost stattt. Die Pyrolysegase werden nachverbrannt und die Energie zur Beheizung des Pyrolyseofens genutzt (Rademacker et al. 2018), wobei schon beim Einsatz von Prepreg-Materialien eine energieautarke Prozessführung gewährleistet werden kann (Rademacker 2021).

Die Nachbehandlung der rCF beinhaltet zunächst eine Entfernung von anhaftenden Pyrolysekoksen von der Faseroberfläche unter hoher Temperatur und Luftzufuhr. Dabei verbrennen die Kokse, jedoch muss ein Abbau der so gewonnenen rCF verhindert werden. Weiterhin können durch die oxidative Nachbehandlung funktionelle Gruppen an der Faseroberfläche gebildet werden, die ein verbessertes Verhalten bei einer Neubeschlichtung der rCF aufweisen und damit bessere Materialeigenschaften im FVW ermöglichen (Meyer 2009; Rademacker und Alberts 2014; Rademacker 2021).

Die freigelegten und von Anhaftungen befreiten rCF werden nachfolgend konfektioniert und vermarktet, wobei das Produktspektrum von gemahlenen und geschnittenen rCF, über pelletierte rCF bis hin zu Faservliesen und Faserpapieren sowie rCF-verstärkten Themoplasten und rCF-verstärkten duroplastischen Formmassen reicht (Mitsubishi Chemical Advanced Materials GmbH 2021). Deren Preise sind produktabhängig und liegen zum Beispiel für gemahlene rCF bei maximal 50 % des Preises von Neufasern (Standard-HTS). Beschlichtete rCF können ab etwa 8 €/kg angeboten werden (Rademacker 2021). Ein Vergleich der mechanischen Eigenschaften von rCF gegenüber Neufasern zeigt, dass das Elastizitätsmodul nahezu identisch ist, die Zugfestigkeit jedoch um bis zu 20 % abnimmt (Hüther 2020). Weiterhin weisen die Fasern ein verändertes Sprödbruchverhalten auf und können sich in der inneren Struktur

unterscheiden (Rademacker 2021). Allerdings müssen diese veränderten Fasereigenschaften keine negativen Auswirkungen auf die Eigenschaften im Verbundwerkstoff bedeuten (Hüther 2020).

Eine zweite Firma zur Pyrolyse CF-haltiger Abfälle befindet sich in Cosley (England) und war unter ELG Carbon Fibre Limited bekannt. Seit Mai 2021 führt Gen2Carbon das Langfasergeschäft weiter und das Kurzfasergeschäft wurde an die Procotex Corporation SA verkauft (Davidson und Heinz 2021).

Dabei wird nun ein „modifizierter Pyrolyseprozess“ (Barnes 2021) betrieben, bei dem eine sauerstoffhaltige Atmosphäre[9] vorliegt, wobei der Prozess mindestens eine Reaktionszone und eine nachfolgende Kühlzone beinhaltet. Der Sauerstoffgehalt der Atmosphäre wird hierbei so gesteuert, dass die Kunststoffmatrix abreagiert und eine Verbrennung der CF minimiert bzw. verhindert wird. Die entstehenden Gase werden abgezogen und nachverbrannt. Die zu behandelnden Materialien werden der Reaktionszone über ein Förderband zugeführt, wobei das Material üblicherweise eine maximale Länge von 2 m und 0,25 m Höhe besitzen darf. Durch die kontinuierliche Betriebsweise können auch relativ lange Bauteile verwertet werden und aus konstruktiven Gründen liegt die einsetzbare Länge im Bereich von maximal 2 m. Die genaue Prozessführung bezüglich Temperaturen und Verweilzeiten ist abhängig von den zu verwertenden Materialien, jedoch werden in der ersten Heizzone Temperaturen im Bereich von 200 bis 600 °C angestrebt, in der zweiten Reaktionszone liegen Temperaturen im Bereich von 500 bis 900 °C vor, wobei die Verweilzeit in der zweiten Heizzone bei weniger als 10 min liegt. Dabei dient die erste Reaktionszone maßgeblich zur Entfernung der Matrix und in der zweiten Zone sollen Koks- und Matrixrückstände von der Faseroberfläche entfernt werden. Abschließend werden die rCF für die Weiterverarbeitung abgekühlt und entladen (Davidson und Price 2009a).

Die Kosten der rCF sollen im Bereich von etwa 10 €/kg liegen, wobei die Kosten von Neufasern üblicherweise im Bereich von etwa 20 bis 50 €/kg liegen und bei der Herstellung von Neufasern etwa 30 t_{CO2}-Equivalente pro Tonne CF freigesetzt werden. Beim Recycling mittels modifizierter Pyrolyse liegt dieser Wert bei unter 5 t_{CO2}-Eq/t_{CF}. Die mechanischen Eigenschaften der rCF zeigen nur geringe Qualitätsverluste nach der modifizierten Pyrolyse, und beim Einsatz im FVW zeigen sich in Abhängigkeit vom Faserfüllungsgrad nur geringe Unterschiede in den Eigenschaften im Vergleich zu Verbunden mit Neufasern (Barnes 2016). Aktuell werden Vliese aus rCF sowie Mischvliese aus rCF mit Thermoplasten vermarktet (Gen 2 Carbon 2021).

Die spanische Firma ***Reciclalia S.L.*** mit Hauptsitz in Madrid betreibt das „Composite Recycling System“ (CRS), das entsprechend deren Angaben nicht als Pyrolyse verstanden wird. Das System ist modular aufgebaut und kann mit Bauteilen von bis zu 6 m bestückt werden (Reciclalia 2021a). Bei diesem Prozess durchläuft das zu rezyklierende Material einen Reaktor mit drei Zonen, die halbkontinuierlich betrieben werden.

In der ersten Zone findet eine pyrolytische Zersetzung der Matrix in inerter Atmosphäre bei Temperaturen zwischen 500 bis 700 °C statt. Dabei liegt das Material in einer sich drehenden Trommel vor, um eine vollständige Abreaktion der Matrix zu gewährleisten. Nach Beendigung des Pyrolyseschrittes werden die freigelegten Fasern in die zweite Zone gefördert, wo eine Begasung in Luft bei Temperaturen zwischen 500 bis 700 °C stattfindet. Dieser Schritt findet ohne Materialrotation statt und dient zur Entfernung von Pyrolysekoksen und Matrixresten. Die in diesen ersten beiden Zonen entstehenden Gase werden energetisch genutzt. Abschließend

[9]Allgemein wird die Pyrolyse als thermochemischer Prozess zur Stoffumwandlung unter Ausschluss von Sauerstoff definiert, sodass eine Verbrennung der Materialien unterbunden wird. Daher entspricht dieser modifizierte Pyrolyseprozess eher einer Vergasung, bei dem eine partielle Oxidation und somit eine Teilverbrennung stattfindet.

werden die freigelegten und gereinigten Fasern in einer dritten Zone abgekühlt, wobei als Kühlmedium Wasser dient, das durch Rohre durch den Reaktor gefördert wird (Alvarez Quintana 2017). Die rCF sollen zu weniger als 10 % im Prozess abgebaut und als geschnittene Produkte vermarktet werden (Reciclalia 2021b).

Eine weitere Pyrolyseanlage wird im italienischen Martignano durch die Firma ***Karborek RCF S.R.L.*** betrieben und soll künftig eine Kapazität von bis zu 1.500 t/a aufweisen (Karborek RCF). Dabei sollen in dem Prozess verschiedene Produktionsabfälle sowie EoL-Abfälle verwertet werden können. Im ersten Reaktorbereich wird in inerter Atmosphäre mittels Stickstoff oder Pyrolysegasen bei Temperaturen im Bereich von 200 bis 700 °C und Verweilzeiten im Bereich von Stunden die Kunststoffmatrix pyrolisiert. Die Entfernung von Pyrolysekoksen von der Faseroberfläche soll im zweiten Reaktorbereich in sauerstoffhaltiger Atmosphäre stattfinden, wobei die Temperatur von der jeweiligen Gaszusammensetzung abhängt. Dabei kann der Reaktor beispielsweise als WS mit höhenabhängigem Temperaturprofil ausgelegt sein. Die Pyrolysegase und -kondensate werden von Schadgasen wie HCl und H_2S gereinigt, nachverbrannt und energetisch genutzt (Candelieri et al. 2003).

Die freigelegten rCF werden nachfolgend weiterverarbeitet und als Filze, bzw. als geschnittene oder gemahlene Fasern vermarktet (Karborek RCF). Dabei sind die mechanischen Eigenschaften der rCF abhängig von deren Faserlänge sowie von der Betriebsweise des Prozesses (Fielding et al. 2009).

Tabelle 63 fasst die wesentlichen Daten zu den vier beschriebenen europäischen Anlagen zur CFK-Pyrolyse zusammen.

Tabelle 63: Übersicht der wesentlichen Informationen zu den europäischen Pyrolyseanlagen der Firmen Mitsubishi Chemical Advanced Materials GmbH, Gen2Carbon, Reciclalia S.L und Karborek RCF S.R.L.

	Mitsubishi Chemical Advanced Materials GmbH	Gen 2 Carbon Limited	Reciclalia S.L.	Karborek RCF S.R.L.
Standort	Wischhafen, DEU	Cosley, GBR	Madrid, ESP (Hauptsitz)	Martignano, ITA
Kapazität [t/a]	1.000 – 1.500	1.300	k. A.	1.500
Technologie	Förderrost	Förderband	Rotierende Trommel (CRS)	k. A.
Betriebsweise	Kontinuierlich	Kontinuierlich	Halb-Kontinuierlich	k. A.
Betriebsbedingungen der Pyrolyse (ohne Faserreinigung und/oder Kühlung)				
Atmosphäre	Inert (Stickstoff)	Sauerstoffhaltig	Inert	Inert (Stickstoff oder Pyrolysegase)
Geometrie Input [m]	≤ 1	≤ 2	≤ 6	k. A.
Temperatur [°C]	≥ 350	Zone 1: 200-600	500-700	k. A.

	Mitsubishi Chemical Advanced Materials GmbH	Gen 2 Carbon Limited	Reciclalia S.L.	Karborek RCF S.R.L.
		Zone 2: 500-900		
Verweilzeit [min]	5-20	Zone 1: k. A. Zone 2: ≤ 10	k. A.	Im Bereich von Stunden
Energiebedarf [MJ/kg]	k. A.	ca. 28	k. A.	k. A.
Emissionen [kgCO2,eq/t]	k. A.	< 5	k. A.	k. A.
Preis rCF [€/kg]	ab 10	ca. 10	k. A.	k. A.

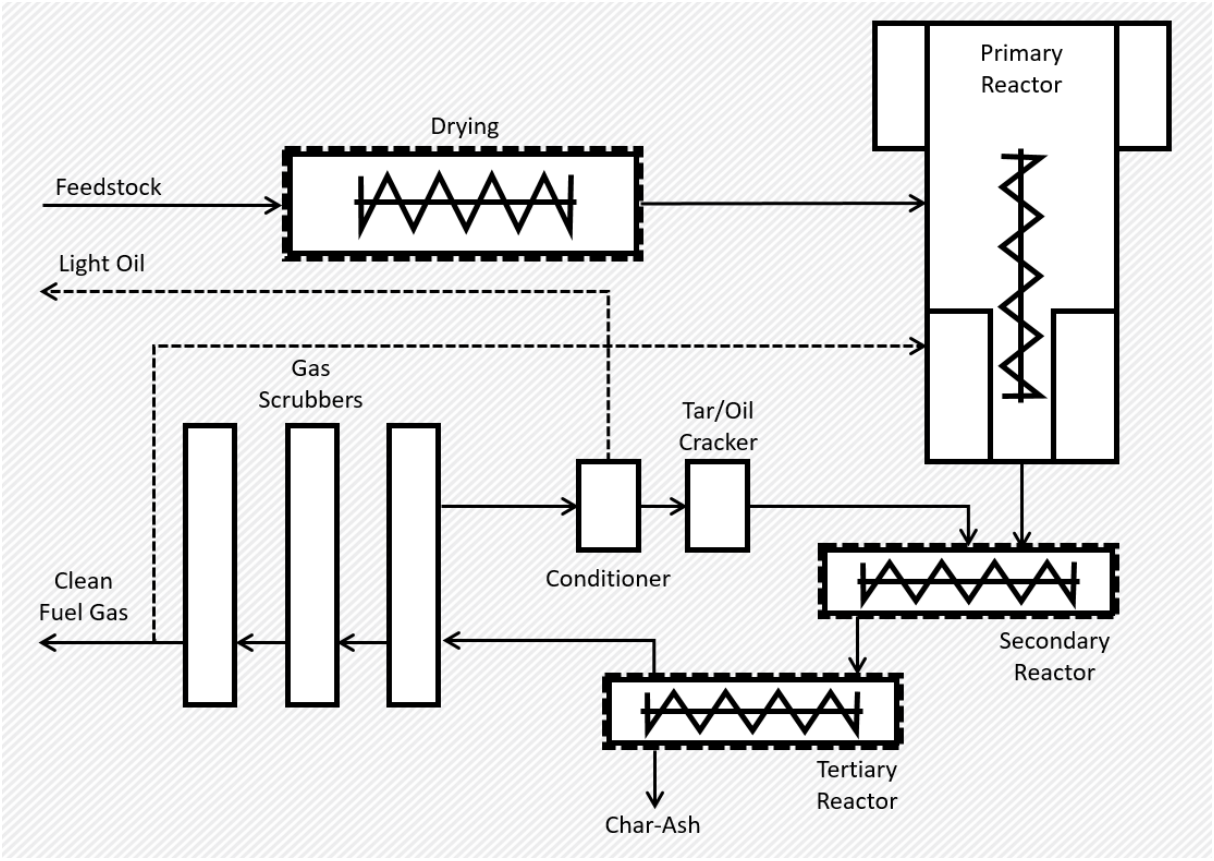
Quelle: Eigene Zusammenstellung, KIT-ITC, nach den im vorausgegangenen Fließtext angegebenen Quellen. (k. A. bedeutet keine Angabe).

Ein weiterer europäischer Anbieter für die Verwertung CF-haltiger Abfälle ist die Firma ***Alpha Recyclage Composites*** mit Sitz in Toulouse (Frankreich), die den Prozess mit Wasserdampf unter der Bezeichnung „Vapo-Thermolyse“ durchführt. Eine Pilotanlage für diesen Prozess wurde 2016 umgesetzt, zu dem keine weiteren Informationen verfügbar sind (Alpha Recyclage Composites 2015).

Weitere Aktivitäten zum pyrolytischen Recycling von CFK gibt es von der ***American Composites Manufacturers Association*** (ACMA) in Zusammenarbeit mit der Firma ***CHZ Technologies***, LLC (Ohio, USA), wobei die als ***Thermolyzer*** bezeichnete Technologie von CHZ Technologies zum Einsatz kommt (Jay 2020; CHZ Technologies 2021a).

Die Firma CHZ Technologies wurde 2014 gegründet, um das patentierte Thermolyzer-Verfahren eines mehrstufigen thermischen Prozesses für das Recycling von kohlenwasserstoffhaltigen Abfallmaterialien, wie Elektronikschrott, Altreifen, Altholz, Schredderleichtfraktionen, thermoplastische Kunststoffabfälle, aber auch FVW in ein reines Synthesegas und verkaufsfähige Nebenprodukte zu vermarkten. Das Synthesegas kann hierbei zur Erzeugung von Strom oder Wärmeenergie verwendet werden. Eine Pilotanlage befindet sich in Deutschland in Forst (Lausitz) mit einem Tagesdurchsatz von 7 t (Coughlin et al. 2021), wobei der Prozess schematisch in Abbildung 170 dargestellt ist.

Abbildung 170: Schematische Darstellung der Thermolyzer-Technologie von CHZ Technologies.



Quelle: Eigene Darstellung, KIT-ITC, nach CHZ Technologies (2021b).

Die US-amerikanische Firma ***Carbon Conversions*** in Lake City (South Carolina), betreibt einen Prozess bei dem CF-haltige Abfälle zunächst auf eine Größe von etwa 2,5 cm zerkleinert und nachfolgend in einem elektrisch beheizten Ofen pyrolysiert werden, wobei die jährliche Kapazität bei 1.800 t liegen soll (Carbon Conversions 2010).

Die ***Japan Carbon Fiber Manufacturers Association*** (JCMA) hat Aktivitäten zum pyrolytischen Recycling von CFK, wobei hierzu keine weiteren Informationen zugänglich sind (Japan Carbon Fiber Manufacturers Association 2013).

6.4.1.3.2 Pyrolyse von CFK in Mikrowellenöfen

Bei der MW-Pyrolyse von CFK wird die MW-Energie maßgeblich über die leitfähigen CF und nur zu einem geringen Anteil über die Matrix in den Verbundwerkstoff eingekoppelt. Wegen der insgesamt mäßigen elektrischen Leitfähigkeit des CFK beträgt die MW-Eindringtiefe im Verbundwerkstoff nur einige Millimeter (Emmerich und Kuppinger 2014). Für den industriellen Einsatz der MW-Pyrolyse ist die Verwendung von Magnetronen mit 915 MHz zweckmäßig, die wesentlich leistungsstärker und kommerziell mit vertretbaren Kosten erhältlich sind. Die größere Wellenlänge bei 915 MHz soll eine Pyrolyse von zerkleinerten Faserverbundteilen ermöglichen (Emmerich und Kuppinger 2014).

In der Literatur sind maßgeblich Ergebnisse zu Laboruntersuchungen im Batchbetrieb in 2,45 GHz MW-Kammeröfen zu finden, wozu nachfolgend zwei Untersuchungen beispielhaft vorgestellt werden.

Ein Vergleich der Eigenschaften von im Labormaßstab mittels konventioneller, thermischer Pyrolyse und mittels MW-Pyrolyse behandelter plattenförmiger CFK-Probenstücke zeigt

deutliche Unterschiede der gewonnenen rCF. Eingesetzt wurden Prepreg-Platten mit einer Abmessung von 120 x 60 x 4 mm, die im Muffelofen bei 600 °C für 80 min behandelt wurden (Emmerich und Kuppinger 2014). Bei den Untersuchungen zur MW-Pyrolyse wurden 6 Platten gestapelt und in einem Keramikgefäß für 180 s einer MW-Leistung von 600 W ausgesetzt. Für beide Verfahren wurde eine Abnahme des Faserdurchmessers festgestellt, der jedoch bei der MW-Pyrolyse an der Oberfläche ausgeprägter war. Die Werte für die Zugfestigkeit, als auch der E-Modul lagen für rCF beider Pyrolyseprozesse unterhalb derer von vCF. Insgesamt war bei der thermischen Pyrolyse die Faserschädigung geringer ausgeprägt als bei der MW-Pyrolyse, wobei als Grund eine unzureichende Prozesskontrolle während der MW-Pyrolyse angegeben wird, die zu einer Überhitzung der Fasern mit einer damit einhergehenden Faserschädigung angeführt wird, was künftig durch eine Temperaturkontrolle des Prozesses unterbunden werden soll.

Bei den Untersuchungen zur MW-Pyrolyse von Seiler et al. (2020) wurden CFK-Probenplatten mit einer Abmessung von 50 x 50 mm und einem Faservolumenanteil von 40 % eingesetzt. Die Mikrowellenfrequenz betrug 2,45 GHz, variiert wurden die Leistung (0,5 bis 0,9 kW), die Behandlungsdauer (210 bis 330 s) sowie die Probenmasse (20 bis 60 g). Als Spülgas wurde Stickstoff eingesetzt, wobei die Faseroberfläche oxidativ zur Entfernung von Koksen nachbehandelt wurde. Bei den Untersuchungen wurden die Pyrolysetemperatur bestimmt und der Masseverlust zum Abbau der Matrix herangezogen. Insgesamt konnte Masseverlust von maximal 45 % erzielt werden, der ab einer Temperatur von ca. 500 °C nicht mehr gesteigert werden konnte.

Ergebnisse zur MW-Pyrolyse von CFK liegen aktuell maßgeblich nur zu Laboruntersuchungen vor, weshalb in der Literatur der Prozess mit TRL 4 bis 5 bewertet (Bennet 2021; Ierides und Reiland 2019) und ein spezifischer Energiebedarf zwischen 5 bis 10 MJ/kg angegeben wird (Suzuki und Takahashi 2005; Job et al. 2016).

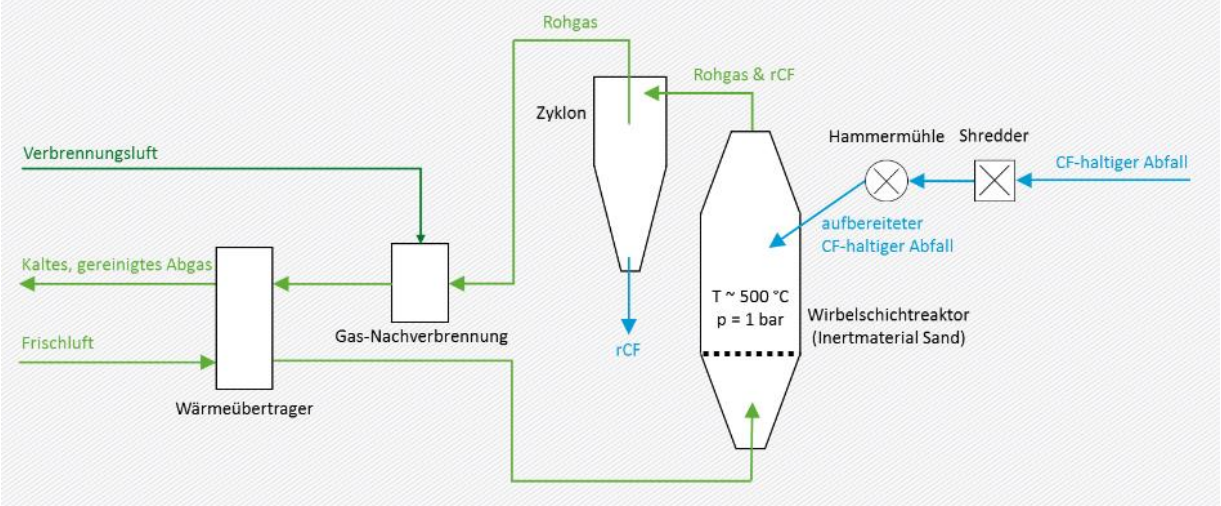
Im Kapitel zur technischen Beschreibung der MW-Pyrolyse wird eine MW-Bandanlagen der Firma Linn High Therm GmbH vorgestellt (Abbildung 145). Eine solche Anlage wurde von Linn High Therm vor Jahren für Untersuchungen zum Recycling von FVW in die USA geliefert, wozu keine Ergebnisse vorliegen. An der TU Bergakademie Freiberg werden im Institut für Wärmetechnik und Thermodynamik diverse Anwendungen der MW-Technik untersucht, so auch ein Recycling von CFK (Arnold et al.). Im BMWi geförderten Projekt PyReCA mit einer Laufzeit von 2019 bis 2022 zum vollständigen stofflichen Recycling von CFK werden Untersuchungen zur MW-Pyrolyse durchgeführt, wobei hierzu bisher noch keine detaillierten Informationen vorliegen (Behrend 2019). Projektpartner in diesem Projekt ist unter anderem die Firma Linn High Therm, die eine MW-Laboranlage und eine MW-Technikumsbandanlage für das Projekt entwickeln.

6.4.1.4 Recycling im Wirbelschichtreaktor

Bezüglich der Verwertung CF-haltiger Abfälle in einer WS wird in der Literatur maßgeblich auf Untersuchungen der „Composites Research Group“ der University of Nottingham verwiesen (Pimenta und Pinho 2011; Oliveux et al. 2015; Zhang et al. 2020). Der Prozess ist etabliert und langjährig untersucht, wobei als Vorteile eine hohe Toleranz gegenüber Verunreinigungen sowie saubere Faseroberflächen ohne Koksrückstände genannt werden. Demgegenüber werden als Nachteile die Abnahme der Zugfestigkeit der rCF, die Abnahme der Faserlänge, das Vorliegen unstrukturierter Faserpackungen nach dem Recyclingprozess sowie die fehlende Rückgewinnung der Schlichte genannt (Pimenta und Pinho 2011).

Die „Composites Reseach Group“ betreibt in Zusammenarbeit mit Boeing eine WS-Anlage im Technikums-Maßstab (Abbildung 171), deren TRL für das CFK-Recycling mit 5 bis 6 angegeben wird (Bennet 2021; Ierides und Reiland 2019).

Abbildung 171: Vereinfachte schematische Darstellung des WS-Reaktors im Technikumsmaßstab zum Recycling aufbereiteter CF-haltiger Abfälle der Universität Nottingham inkl. der wesentlichen Aggregate und Ströme.



Quelle: Eigene Darstellung und Übersetzung, KIT-ITC, nach Meng (2017).

Die CF-haltigen Abfälle werden je nach Ausgangsgröße zunächst geschnitten und in einem Doppelwellen-Schredder auf eine Größe von 25 bis 100 mm, bei einem Energiebedarf von 0,04 MJ/kg, vorzerkleinert. Nachfolgend wird das vorzerkleinerte Material in einer Hammermühle auf 5 bis 25 mm bei einem Energiebedarf von 0,22 MJ/kg gemahlen. CF-haltige Abfälle mit einer Länge von etwa 6 mm stellen ein ideales Verhältnis zwischen der Förderbarkeit und den Eigenschaften der rezyklierten Carbonfasern (rCF) dar. Die zerkleinerten CFK-Stücke werden in den WS-Reaktor eingebracht, der im Umluftbetrieb bei Temperaturen von 450 bis 550 °C betrieben wird. Als Medium zur Wärmeübertragung wird Sand genutzt und unter diesen Bedingungen die Matrix zersetzt, die rCF aber nicht wesentlich angegriffen, die mit dem Gasstrom aus dem Reaktor ausgetragen und in einem Zyklon abgetrennt und gesammelt werden. Der Gasstrom wird nachverbrannt und der Abgasstrom in einem Wärmetauscher zur Erwärmung von Frischluft verwendet.

Die Kapazität der Anlage wird mit einem jährlichen rCF-Output von 50 t_{rCF} angegeben, wobei die benötigte Energie für das Recycling im Technikumsmaßstab mit etwa 10 % bezüglich der benötigten Energie der Neufaserherstellung angegeben wird, die bei ca. 300 MJ/kg liegt. Eine Reduktion des Energiebedarfs auf etwa 5 % soll durch einen höheren spezifischen Durchsatz pro Reaktorfläche erzielbar sein (Meng 2017; Pickering et al. 2015).

Die Oberflächeneigenschaften von drei recycelten rCF beim Einsatz unterschiedlicher CF-haltiger Abfälle, mit PAN-basierten Fasern der Kategorie High Tensile Strengh (HTS), wurden nach dem Recycling im Wirbelschichtreaktor[10] untersucht. Dabei zeigt sich, dass die Bindungseigenschaften der rCF zur Matrix bei der WS-Behandlung nicht abgenommen haben und die funktionellen Gruppen an der Faseroberfläche eine höhere Oxidationsstufe bei gleichbleibendem O/C-Verhältnis aufweisen (Jiang et al. 2008).

Die mechanischen Eigenschaften verschiedener Fasern nach der CFK-Verwertung im WS-Reaktor zeigen leichte Änderungen des E-Moduls gegenüber Neufasern (vCF), wobei die

[10]Der Reaktor wies eine Höhe von 2500 mm sowie einen Durchmesser von 300 mm auf, und wurde mit Sand von einer mittleren Korngröße von 0,8 mm auf eine Schütthöhe von 50 mm befüllt. Das Bett wurde mit vorgeheizter Luft mit einer Geschwindigkeit von 1,0 m/s durchströmt, bis die Betttemperatur 550 °C erreicht hat. Nachfolgend wurden CFK in den Reaktor gegeben und diese für 10 min thermisch behandelt, bevor sie über einen Zyklon abgetrennt wurden.

Zugfestigkeit der untersuchten rCF zwischen 2 bis 54 % abgenommen hat (Tabelle 64). Dieses Verhalten wird einerseits durch eine mechanische Faserschädigung durch die abrasive Wirkung der Sandpartikeln, andererseits durch eine mögliche Schädigung der rCF durch die oxidative Atmosphäre bei erhöhten Temperaturen erklärt (Meng 2017; Pickering et al. 2015).

Tabelle 64: Gemessene Zugfestigkeiten und E-Moduln von unbehandelten PAN-basierten Carbonfasern (vCF) und den jeweils im WS-Reaktor bei 550 °C rezyklierten Carbonfasern (rCF).

Carbonfaser	Zugfestigkeit vCF [GPa]	Zugfestigkeit rCF [GPa]	Zugfestigkeit Änderung [%]	E-Modul vCF [GPa]	E-Modul rCF [GPa]	E-Modul Änderung [%]
Toray TORAYCA T300s	4,24	4,16	- 2	227	218	- 4
Toray TORAYCA T600s	4,84	3,18	- 34	208	218	+ 5
Toray TORAYCA T700	6,24	2,87	- 54	218	219	+ 0,5
Toray TORAYCA T800*	5,99	4,90	- 18	308	334	+ 8
Hexcel HexTow AS4	4,48	2,78	- 38	231	242	+ 5
Mitsubishi PYROFIL MR60H	5,32	2,63	- 51	227	235	+ 3
Mitsubishi GRAFIL 34-700	4,09	3,05	- 25	242	243	+ 0,5

Quelle: Eigene Zusammenstellung und Übersetzung, KIT-ITC nach Meng (2017) und Pickering et al. (2015). Ergänzungen zum CF-Namen durch KIT-ITC.
*) Temperatur des Wirbelschichtreaktors 500 °C.

6.4.1.5 Recycling mittels thermokatalytischer Entgasung

Bei dem Verfahren der thermokatalytischen Entgasung des Verfahrens- und Anlagenentwicklers für energieeffiziente Recyclingprozesse ***Global EnerTec AG***, mit Hauptsitz in Berlin (Research & Operations Center in Guben), werden aktuell organische Abfälle, meist Altreifen, thermisch unter Anwesenheit eines Katalysators zu Rohgas und Koks umgewandelt. Beide Stoffströme werden nachfolgend aufbereitet und teils zum Betrieb der Anlage verwendet (Global EnerTec AG). Die Firma Global EnerTec forscht aktuell in Zusammenarbeit mit der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus-Senftenberg zur thermokatalytischen Entgasung von CFK-Abfällen in einem vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie geförderten Projekt. In dem Projekt soll eine bestehende Pilotanlage der Firma Global EnerTec AG in Guben für den Einsatz von CF-haltigen FVW umgebaut und optimiert werden.

Weiterhin sind Laboruntersuchungen zu den mechanischen Eigenschaften der rCF sowie den Eigenschaften von Bauteilen mit rCF geplant (RecyclingPortal 2021). Mithilfe der katalytisch unterstützen Pyrolyse soll die Effizienz des Prozesses gesteigert werden. Das sollen die Untersuchungen an der Pilotanlage in Guben zeigen, die von der Brandenburgischen TU Cottbus-Senftenberg gemeinsam mit der Firma Global EnerTec AG betrieben wird. Mit dieser Pilotanlage soll in Guben die weltweit erste thermokatalytische Entgasungsanlage für CFK-Abfälle zur Verfügung stehen, wobei die Technologie von Global EnerTec AG für das CFK-Recycling vermarktet werden soll.

6.4.1.6 Recycling mittels Solvolyse

Die Solvolyse CF-haltiger Abfälle erfolgt identisch zu derjenigen von GFK, da die Matrixwerkstoffe weitgehend identisch sind. Somit stimmen Prinzipien, Parameter und Rahmendbedingungen weitgehend mit dem GFK-Recycling überein und der TRL kann mit 4 für die superkritische Solvolyse von CFK genannt werden, was bisher durchgeführten Untersuchungen im Labormaßstab entspricht (Bennet 2021). Die konventionelle Pyrolyse ist das gängigste Verfahren zum CFK-Recycling, wobei die Zersetzungsprodukte der Matrix meist energetisch genutzt werden. Die Solvolyse hingegen ermöglicht eine Rückgewinnung von rCF und der Polymermatrix. Der Energiebedarf der Solvolyse soll gegenüber den thermochemischen Prozessen geringer und die Qualität der rezyklierten Fasern höher sein (Keith et al. 2016). So gewonnene rCF liegen je nach Vorbehandlung als kurze Fasern mit zufälligen Längen oder als gewebte Stücke rCF, entsprechend dem Inputmaterial, vor (Oliveux et al. 2015).

Die Herausforderungen bezüglich der Solvolyse besteht darin, eine selektive, schnelle, als auch schonende Methode für die Zersetzung des Matrixmaterials zu finden, was nicht einfach bei der Vielzahl unterschiedlicher duroplastischer Harze ist, die jeweils unterschiedlich abgebaut werden. Um diese Randbedingungen zu erfüllen wird häufig die Zersetzung unter überkritischen Bedingungen genutzt. Hierzu eignen sich unter anderem n-Propanol, n-Butanol, Wasser oder Mischungen von Wasser und Aceton. Die Solvolyse unter überkritischer Bedingung erfordert allgemein hohe Temperaturen (300 bis 400 °C) und hohe Drücke (5 bis 15 MPa), um den überkritischen Zustand des Lösungsmittels zu erzielen. Unter Atmosphärendruck wird für die Solvolyse duroplastischer FVW Salpetersäure, oder Benzylalkohol mit Trikaliumphosphat verwendet, wobei durch Oxidation kritische Nebenprodukte entstehen können. In der Arbeit von Schamel et al. (2021) wird über Wasserstoffperoxid berichtet, das für Epoxidharze geeignet sein soll und milde Solvolysebedingungen besitzt, wobei keine kritischen Nebenprodukte entstehen sollen.

Untersuchungen zur Solvolyse von CFK mit PAN-basierten CF in einer Epoxidmatrix, mit einer Vorbehandlung in Salpetersäure und nachfolgender Behandlung in einer Mischung aus Macrogol 400 und einer Kaliumhydroxid-Lösung bei Temperaturen zwischen 120 bis 180 °C für bis zu 200 min zeigen, dass bei Temperaturen ab 160 °C bei einer Behandlungsdauer von 200 min die Epoxidmatrix nahezu vollständig entfernt werden kann. Weiterhin konnte durch diese Behandlung die Benetzbarkeit der rCF gesteigert werden. Die Zugfestigkeit nahm mit steigender Temperatur und Behandlungsdauer ab, lag jedoch noch bei mindestens 91 % der Zugfestigkeit von Neufasern. Die Daten hierzu sind in Tabelle 65 zusammengefasst (Jiang et al. 2017).

Tabelle 65: Vergleich der mechanischen Eigenschaften von Carbonfasern vor und nach dem Recycling von CFK mittels Solvolyse.

Mechanische Eigenschaft	Primäre CF	Rezyklierte CF
Zugfestigkeit [GPa]	4,07 ± 0,73	3,89 ± 0,75
E-Modul [GPa]	179,27 ± 12,5	173,9 ± 15
Bruchdehnung [%]	2,36 ± 0,45	2,28 ± 0,45

Quelle: Eigene Zusammenstellung und Übersetzung, KIT-ITC, nach Jiang et al. (2017).

Untersuchungen zur Solvolyse von CFK in einem Gemisch aus Wasser und Aceton (80:20) bei superkritischen Bedingungen (320°C und 170 bar) und einer Behandlungszeit von 2 Stunden zeigen eine Zersetzung der Polymermatrix (Epoxidharz) von 98 %. Die rezyklierten Fasern

wurden nicht beschädigt und eine gewebte Faserstruktur blieb erhalten. Der Energiebedarf lag bei einer Reaktorbeladung von 300 g bei 19,2 MJ/kg, wobei der Energiebedarf zur Herstellung von Primär-CF mit 198 bis 594 MJ/kg angegeben wird, sodass der Energiebedarf beim Recycling gegenüber der Primärroute auf 3 bis 10 % abgeschätzt und im Vergleich zur Pyrolyse die Solvolyse unter diesen Bedingungen etwa 40 % weniger Energie benötigt (Keith et al. 2016). Der Energiebedarf der Solvolyse ist allgemein stark abhängig von den jeweiligen Verfahrensparametern und Einsatzstoffen. Untersuchungen in Pilotanlagen haben einen Energiebedarf von 21 MJ/kg bis hin zu 63 bis 91 MJ/kg ergeben (Job et al. 2016).

Allgemein erfolgten die in der Literatur beschriebenen Untersuchungen zur Solvolyse von CFK meist im Labormaßstab, und es gibt kaum Informationen über Verfahren die über einen TRL von 4 hinausgehen (Krauklis et al. 2021; Job et al. 2016).

Insgesamt gibt es nur wenige Firmen, die dieses Verfahren außerhalb von Labor- bzw. Technikumsuntersuchungen nutzen, und nach Angaben von Job et al. (2016) und Kumar und Krishnan (2020) ist das Verfahren der Solvolyse für FVW noch nicht kommerzialisiert.

Die Firma V-Carbon GmbH in Taufkirchen (Bayern) forscht mit Industriepartnern zum Recycling von CFK und betreibt eine Pilotanlage zum Recycling von Verbundwerkstoffen.

Eine Pilotanlage von Panasonic Electric Works in Japan soll beispielsweise 200 t/a an FVW verarbeiten. Die US-Firma „Vartega Carbon Fiber Recycling LLC“ (Hauptsitz in Golden, Colorado) eröffnete 2019 eine Pilotanlage mit einem jährlichen Durchsatz von 168 t Prepreg-CFK und nutzt einen modular aufgebauten Prozess. Die so gewonnen rCF sollen nahezu gleiche mechanische Eigenschaften wie Neufasern besitzen, wobei deren Kosten bei etwa 50 % von Neufasern liegen sollen (Vartega Inc 2021).

Die Firma Hitachi Chemical Ltd. (Japan) entwickelte einen Solvolyseprozess für das CFK-Recycling unter Normaldruck bei 180°C, und verwendet als Lösungsmittels Benzylalkohol mit Zugabe von Kaliumphosphat als Katalysator. Die Behandlungszeiten variieren zwischen 5 bis 20 Stunden. Mit dem Verfahren wurden Sportgeräte aus CFK recycelt und aus den rückgewonnenen Fasern neue Sportgeräte hergestellt. Die Zugfestigkeit der sekundären Fasern soll hierbei mit zunehmender Faserlänge abnehmen, und kurze Fasern sollen nicht mehr als Verstärkungsmaterial eingesetzt werden können (Morin et al. 2012).

Die Firma Catack-H aus Südkorea gibt an, ein Solvolyseverfahren zum Recycling von CFK zu betreiben, welches eine hohe rCF-Qualität bei einer Rückgewinngungsrate von über 90 % der Fasern gewährleisten soll. Die so gewonnenen rCF können, laut Betreiber, zu etwa 70 % des Preises von Fasern aus einer thermischen Behandlung angeboten werden, wobei das Produktspektrum der Firma geschnittene und gemahlene CF, CF-Granulat, 3D-Druck Filamente aus CF, CF-Trockengewebe sowie CF-Bauteile z. B. für die Automobilbranche umfasst (Catack-H 2019).

6.4.1.7 Zusammenfassung und Beurteilung der Prozesse zum Recycling von CFK

Aktuell stellt die Pyrolyse den einzig kommerziell etablierten Prozess zur Verwertung CF-haltiger Abfälle zur Gewinnung von rCF dar. Dabei sind die Kapazitäten begrenzt, und neben den aktuell hauptsächlich anfallenden, sortenreinen Produktionsabfällen fallen künftig vermehrt CFK-Abfälle nach deren Nutzungsphase an (EoL-Abfälle). Dies betrifft voraussichtlich zunächst CFK aus dem Automobil-, Sport- und Freizeitbereich. CFK-Abfallströme aus Rotorblättern werden folgen, und es besteht ein Bedarf der Schaffung zusätzlicher Verwertungskapazitäten. Die Möglichkeiten der Verwertung verschiedener faserhaltiger Abfallströme in einer Anlage sollte geprüft werden.

Die Verwertung von CFK in einer WS konnte in einer Technikumsanlage erfolgreich demonstriert werden. Hierbei ist zu beachten, dass die Abfälle und somit die Fasernlängen vor dem Einsatz im WS-Reaktor durch einen Zerkleinerungsschritt reduziert werden. Während der Behandlung werden die freigelegten CF durch die Sandschüttung beansprucht, sodass ein Einsatz so gewonnener rCF für Folgeanwendungen zu prüfen ist.

Die HV-Fragmentierung CF-haltiger Abfälle ist eine Option, da die Fasern im Prozess nicht angegriffen, sondern an der Grenzfläch zwischen Matrix und Faser aufgetrennt werden. Hierzu sind weiterführende Untersuchungen zum Einfluss der Prozessparameter sowie von Materialkombinationen (Fasertyp, Matrix) auf die Eigenschaften der rCF notwendig.

Die weiteren im vorausgegangenen Kapitel beschriebenen Verfahren sind bisher nicht über Untersuchungen im Labormaßstab hinaus entwickelt, oder es liegen keine ausreichenden Daten für eine technische Beurteilung vor.

Bei allen betrachteten Recyclingverfahren liegen die Faserkennwerte der so gewonnen rCF deutlich unter den Werten von vCF (Tabelle 66).

Tabelle 66: Verbleibende Zugfestigkeiten von in verschiedenen Prozessen rezyklierten Carbonfasern (rCF) gegenüber Neufasern.

Recyclingverfahren	Zugfestigkeit rCF (bezogen auf Neufaser) [%]
Mechanische Prozesse	~ 50
Wirbelschichtreaktor	~ 75
Konventionelle Pyrolyse	~ 80
Mikrowellenpyrolyse	~ 80
Hochvolt-Fragmentierung	~ 83
Solvolyse	~ 95

Quelle: Eigene Zusammenstellung und Übersetzung, KIT-ITC, nach Krauklis et al. (2021).

Tabelle 67 fasst die wesentlichen Ergebnisse der Beurteilung der Prozesse zum CFK-Recycling zusammen.

Tabelle 67: Zusammenfassung der CF-erhaltenden Verfahren zum Recycling von CFK.

Prozess	TRL	Kapazität [t/a]	Kosten [€/kgrCF]	Energiebedarf ggü. Neufaserherstellung [%]	Emissionen [kgCO2,eq/t]
Mechanische Zerkleinerung	6 - 7	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.
Fragmentierung	6	5 – 6 kg/h	k. A.	k. A.	k. A.
Recycling in Wirbelschicht	5 - 6	50	k. A.	ca. 10	k. A.
Konventionelle Pyrolyse	9	DEU: < 1.500 EU: ≤ 6.000	ab 5	ca. 10 – 15	< 5
Mikrowellenpyrolyse	4 – 5	wenige g/Batch	k. A.	k. A.	k. A.

Prozess	TRL	Kapazität [t/a]	Kosten [€/kgrCF]	Energiebedarf ggü. Neufaserherstellung [%]	Emissionen [kgCO2,eq/t]
Thermokatalytische Entgasung	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.
Tief-/Hochtemperatur Sololyse	4	k. A.	k. A.	k. A.	Keine
Überkritische Solvolyse	4	k. A.	k. A.	ca. 3 - 10	Keine
Thermokatalytische Entgasung	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.

Quelle: Eigene Zusammenstellung, KIT-ITC, nach den im vorausgegangenen Kapitel angegebenen Quellen.

6.4.2 Prozesse zur Nutzung der Carbonfaser als Rohstoff

Bei den Prozessen des rohstofflichen Recyclings von CF-haltigen Abfällen wird der darin gebundene Kohlenstoff genutzt, eine Wiederverwendung der Fasern findet somit nicht statt. Eine solche Nutzung kann beispielsweise als Reduktionsmittel in verschiedenen metallurgischen Prozessen oder durch chemische Einbindung in ein neues Material, beispielsweise eine Grundchemikalie, erfolgen.

6.4.2.1 Einsatz in metallurgischen Prozessen

Erste Untersuchung verschiedener kohlenstoffhaltiger Abfallstoffe, darunter CFK, als Einsatzstoff bei der Eisen- und Stahlherstellung ergaben, dass dies bei entsprechender Vorbehandlung möglich sein sollte. Kunststoffhaltige Abfälle wurden bei verschiedenen Temperaturen pyrolysiert (1.000 °C bis 1.550 °C) und die zurückgebliebenen Feststoffe charakterisiert, wobei sich abhängig vom Material und der Pyrolysetemperatur deutliche Unterschiede zeigten (Mansuri et al. 2017). Ein Vergleich mit den Eigenschaften industriell eingesetzter Kohlenstoffträger fand bisher nicht statt; auch wurde das Schütt- oder Förderverhalten nicht untersucht, was jedoch einen wesentlichen Einfluss auf die Eignung der Materialien für den jeweiligen Prozess hat.

In einem vom THINKTANK Industrielle Ressourcenstrategien des Landes Baden-Württemberg geförderten Projekt wird vom Institut für Technische Chemie (ITC) des KIT in Zusammenarbeit mit den Badischen Stahlwerken (BSW) die prinzipielle Eignung des Einsatzes aufbereiteter CF-haltiger Abfälle beim Stahlrecycling im Elektrolichtbogenofen betrachtet. Bei diesem Prozess des Stahlrecyclings werden verschiedene Kohlen in Form von Chargenkohle zu Beginn des Prozesses oder als Blaskohle während des Prozesses zugegeben. Entsprechend erfüllen diese beiden Kohlearten verschiedene Aufgaben im Prozess und unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Spezifikationen. In diesem Projekt wurden bisher zunächst die Anforderungen an die Aufbereitung der potentiell einzusetzenden CF-haltigen Abfälle untersucht. Hierbei zeigte sich, dass zur Substitution der beiden Kohlen nach entsprechender Aufbereitung prinzipiell CF oder CFK eingesetzt werden können. Zur weiteren Bewertung muss die gesamte Prozesskette von der Anlieferung der Materialien, deren Förderung und Zugabe in den Lichtbogenofen sowie mögliche Auswirkungen auf Produkte und Reststoffe betrachtet werden, wobei der Fokus auf einem möglichen Austrag von unvollständig umgesetzten CF in Produkte oder über den Abgaspfad zu berücksichtigen sind. In Laboruntersuchungen wurden die spezifische BET-Oberfläche sowie das Abbauverhalten unbeschlichteter, gemahlener PAN-basierter CF und einer

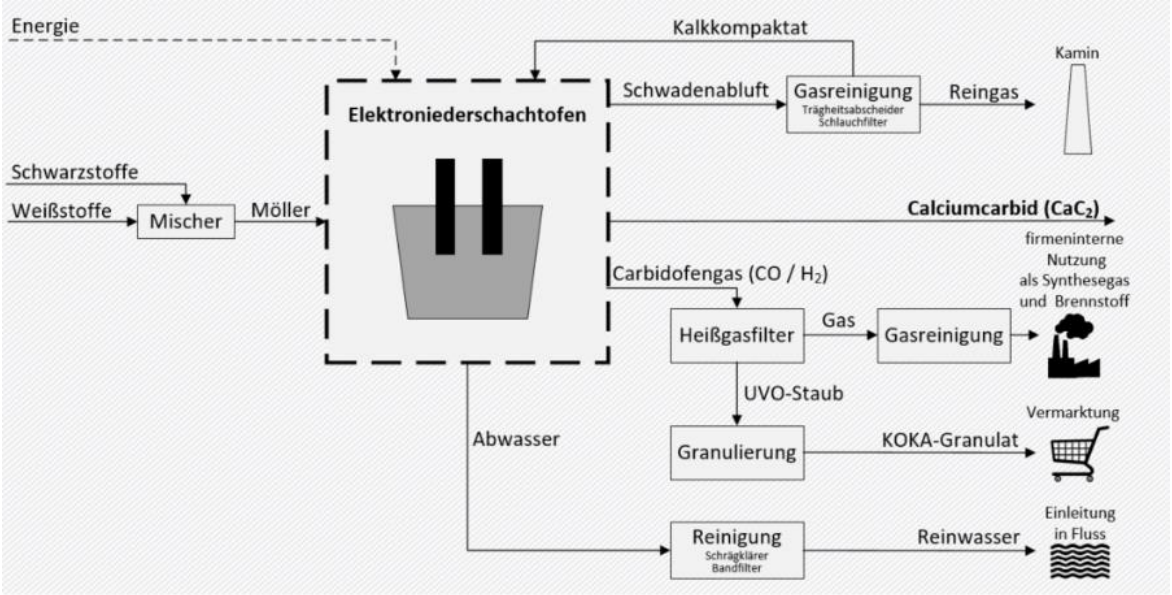
industriell eingesetzten Blaskohle in Stickstoff und synthetischer Luft vergleichend untersucht (Wexler et al. 2021).

Der Einsatz von CF-haltigen Abfällen in metallurgischen Prozessen ist ebenfalls Thema des durch das vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie über die Forschungsvereinigung Carbon Composites Leichtbau GmbH durch die Industrielle Gemeinschaftsforschung der AiF geförderten Projekts „CF Pyro“. Das Vorhaben wird durch die RWTH Aachen mit dem Lehr- und Forschungsgebiet Technologie der Energierohstoffe und der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung im Zeitraum von 05/2020 bis 10/2022 bearbeitet (AiF Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e. V. 2021). Dabei soll das Verhalten von CF-haltigen Abfällen in metallurgischen Prozessen im Labor- und Technikumsmaßstab untersucht und abschließend eine Technologiebewertung durchgeführt werden (Schlögl).

6.4.2.2 Einsatz bei der Herstellung von Calciumcarbid

Die Eignung CF-haltiger Abfälle als Reaktionspartner zur Synthese von Calciumcarbid (CaC_2), einem Grundstoff u. a. für die Düngemittelproduktion und zur Herstellung von Acetylengas, wurde im Rahmen eines vom UBA geförderten Projekts bei der Firma AlzChem Trostberg GmbH am Standort Hart untersucht (Quicker et al. 2021). Bei diesem Prozess werden verschiedene Calciumoxide (Weißstoffe) und Kohlen, bzw. Kokse (Schwarzstoffe) in einem Elektroniederschachtofen unter Zuführung von Energie bei Temperaturen im Bereich von 2.000 bis 2.300 °C geschmolzen und reagieren zum Hauptprodukt CaC_2 und dem sog. Carbidofengas, das im Wesentlichen aus Kohlenmonoxid (CO) und Wasserstoff (H_2) besteht (Abbildung 172). Dabei liegt die Reinheit des CaC_2 üblicherweise zwischen 70 bis 80%. Im Carbidofengas liegt der Anteil an H_2 bei 10 bis 30 Vol.% und der CO-Anteil bei 60 bis 80 Vol.-% (Walter et al. 2017).

Abbildung 172: Schematische und vereinfachte Darstellung der wesentlichen Stoff- und Energieströme bei der Herstellung von Calciumcarbid im Elektroniederschachtofen.



Quelle: Eigene Darstellung, KIT-ITC.

Dieser Prozess ist energie- und rohstoffintensiv. Zur Herstellung einer Tonne CaC_2 werden etwa 873 kg Weißstoffe, 546 kg Schwarzstoffe sowie ein Energieeintrag von 3,317 MWh benötigt (AlzChem Group AG 2019). Zu den eingesetzten Schwarzstoffen gehören verschiedene Kohlen

und Kokse sowie Kalzinat[11], die Kohlenstoffgehalte im Bereich von etwa 70 bis 99 Ma.-% aufweisen und deren Kosten im Bereich von 150 bis 450 €/t liegen (Walter 2021). Aktuell könnten Teile der Schwarzstoffe mit Kunststoffabfällen (Meyer 2011), vorzugsweise Polyethylen (PE), Polypropylen (PP), Polyurethanen (PUR), Polyacrylnitrilen und Polyvinylchlorid (PVC) substituiert werden. Dabei können auch Kunststoffmischungen mit Fluor- und Chlorgehalten von jeweils ≤ 10 Ma.-% verwertet werden, da diese Stoffe mit Branntkalk zu den ungefährlichen Verbindungen Calciumfluorid („Flussspat“) bzw. Calciumchlorid reagieren und abgeschieden werden (Meyer 2011; Baumann et al. 2007).

Zur Prüfung der potentiellen Eignung CF-haltiger FVW wurden bei der Fa. AlzChem betriebsintern Voruntersuchungen zur Verwertung CFK-haltiger Einsatzstoffe im kleintechnischen Maßstab durchgeführt. Dabei konnten 20 % der Schwarzstoffmischung erfolgreich durch CFK ersetzt werden, wobei keine relevanten Mengen an CF mit WHO-Geometrie in der Arbeitsplatzumgebung detektiert wurden (Walter 2017). Ausgehend von diesen Versuchen wurden nachfolgende Anforderungen an das Einsatzmaterial definiert:

- möglichst keine Fremdstoffe, insbesondere (Schwer-)Metalle und Glasfasern (GFK),
- möglichst kein Staub oder Fasermehl, kein Wirrfließ,
- maximale Kantenlänge 70 mm und saubere, möglichst unbeschädigte Kanten, wobei
- der Einsatz ist theoretisch auch in brikettierter Form möglich, wenn o. g. Anforderungen erfüllt sind.

Konkretisiert werden diese Spezifikationen in einer Patentanmeldung der Fa. AlzChem dahingehend, dass CF-haltige Kunststoffe mit Fasergehalten zwischen 10 bis 90 Ma.-% eingesetzt werden können, wobei eine Vielzahl an Matrix-Kunststoffen einsetzbar ist. Je nach Art der Zugabe ist ein Teilchendurchmesser zwischen 5 bis 100 mm erforderlich, es können jedoch auch kompaktierte, und/oder extrudierte Materialien eingesetzt werden, deren Durchmesser maximal 100 mm betragen sollte. Insgesamt könnten durch den Einsatz entsprechend aufbereiteter CFK-Abfallströme bis zu 50 Gew.-% der Schwarzstoffe substituiert werden, wobei neben den CF auch ein Kunststoff-Anteil stofflich genutzt werden kann. Dies haben Technikumsuntersuchungen gezeigt, dass beim Einsatz von CF-haltigem FVW mit Epoxidharzen die CaC_2-Ausbeute steigt, jedoch die Carbidofengase nicht im erwarteten Maße. Es wird vermutet, dass die CF eine stabilisierende Wirkung auf das Epoxidharz aufweisen und dessen Verkokung fördern, sodass der entstehende Kohlenstoff chemisch in das Calciumcarbid gebunden werden könnte (Walter et al. 2017).

Aufbauend auf diesen Voruntersuchungen wurden großtechnische Untersuchungen im Rahmen eines UBA-Projekts (FKZ 3716 34 318 0) an einem Produktionsofen der Fa. AlzChem am Standort Hart in zwei Versuchszeiträumen mit verschiedenen Mengen an CFK-Pellets durchgeführt, um Schwarzstoffe zu substituieren. Dabei wurden CFK-Pellets mit einem CF-Gehalt von etwa 22,4 Ma.-% dem Prozess über Becherwerke mit den sonstigen Schwarzstoffen zugeführt. Im ersten Versuchszeitraum wurden umgerechnet 1 t_{CF}/Tag verwendet und im zweiten Versuchszeitraum auf 2,3 t_{CF}/Tag erhöht. Der Anlagenbetrieb wurde während dieser Versuchskampagnen zu keinem Zeitpunkt beeinträchtigt.

Im ersten Versuchszeitraum wurden somit umgerechnet 0,68 % der Schwarzstoffe durch CF substituiert. Die Beprobung aller Haupt- und Nebenprodukte sowie des Gaspfades und der

[11]Petrolkoks ist ein Reststoff aus der Erdölaufbereitung und kann durch Trocknung und Entfernung von Flüchtigen zu Kalzinat weiterverarbeitet werden.

Reststoffe ergab, dass die Wiederfindung der CF bei 2,4 Ma.-% lag, wobei etwa 80 % der wiedergefundenen CF im unverbrannten Ofenstaub (UVO-Staub) vorlagen und dort etwa 0,2 % der Staubmenge ausmachten. Die restlichen CF fanden sich nahezu vollständig im CaC_2, wo sie keinen nennenswerten Massenanteil aufwiesen.

Ein ähnliches Ergebnis liegt für den zweiten Versuchszeitraum vor, in dem 1,56 % der Schwarzstoffe durch CF ersetzt und insgesamt ca. 3,0 % der CF wiedergefunden wurden. Hierbei verblieben ca. 77 % der CF im UVO-Staub und machten dort 0,56 % der Gesamtstaubmenge aus. Die restlichen Fasern verblieben im CaC_2.

In beiden Versuchszeiträumen konnten nur geringe Anteile an CF in den Produkten und Reststoffen gefunden werden, die eine Geometrie nach Definition der WHO aufweisen und damit als lungengängig und potentiell krankheitserregend eingestuft werden. Weiterhin konnten alle CF in den Reststoffen sicher zurückgehalten werden, sodass keine Faseremission in die Umwelt erfolgte (Quicker et al. 2021). Zusätzlich wurden während der Versuchskampagne mobile und stationäre Arbeitsplatzmessungen an relevanten Standorten durchgeführt (Walter 2019), wobei diese Ergebnisse nicht veröffentlicht sind.

Zusammenfassend können bei der CaC_2-Herstellung im Elektroniederschachtofen hohe CF-Umsätze ohne Beeinflussung der Prozessführung erzielt und bei einer kontinuierlichen Substitution von 1,56 % der Schwarzstoffe könnten jährlich etwa 1.120 t an CF in diesem Prozess verwertet werden, ausgehend von den im Jahr 2018 am Standort Hart eingesetzten 72.000 t an Schwarzstoffen (AlzChem Group AG 2019). Der Prozess kann allerdings aktuell noch nicht zur Verwertung von CF-haltigen Abfällen empfohlen werden, da die notwendige Aufbereitung der CF-haltigen Abfälle noch nicht abschließend geklärt ist. Die im Rahmen des UFO-Plan Projekts eingesetzten CFK-Pellets wurden durch Dritte zunächst zweistufig zerkleinert und im zweiten Zerkleinerungsschritt Kunststoffabfälle zudosiert. Nachfolgend wurde das Gemisch zu Pellets mit einem Durchmesser von ca. 2 cm und einer Länge von 4 cm verarbeitet (Quicker et al. 2021). Informationen zu Kosten dieser relativ aufwändigen Aufbereitung von CF-haltigen Abfallströmen sind nicht veröffentlicht; jedoch liegt der spezifische Preis pro Tonne CFK-Pellets deutlich oberhalb der Kosten für die standardmäßig eingesetzten Schwarzstoffe (Walter 2021).

Weiterhin konnten 97 bis 98 % der eingesetzten CF im Prozess umgesetzt werden, die verbleibenden 2 bis 3 % befanden sich maßgeblich im unverbrannten Ofenstaub des Carbidofengases und im Hauptprodukt CaC_2. Der sogenannte UVO-Staub wird als Nebenprodukt vermarktet. Hierzu sind weiterführende Untersuchungen zum Einfluss der CF auf die Produktqualität der Haupt- und Nebenprodukte notwendig, um weiterführende Prozessschritte bestimmen zu können. Weiterhin sollte geprüft werden, ob die bei der Gas- und Wassereinigung anfallenden und mit CF verunreinigten Reststoffe in gewohnter Weise verwertet werden können, wozu noch keine Aussage möglich ist.

Bei einem dauerhaften Einsatz aufbereiteter CFK-haltiger Einsatzstoffe sind technische und organisatorische Abläufe zu optimieren, darunter die Rohstoffförderwege sowie Kühl- und Sperrwasserkreisläufe (Walter 2017). Der TRL des Prozesses zur Verwertung von aufbereiteten CF-haltigen Abfallströmen kann mit 7 bis 8 abgeschätzt werden (Walter 2021).

6.4.2.3 Zusammenfassung und Beurteilung der Prozesse zur Nutzung der Carbonfaser als Rohstoff

Der Einsatz CF-haltiger Abfälle bei der CaC_2-Herstellung wurde im Rahmen eines Projekts untersucht. Dabei konnten mehr als 97 % der eingesetzen CF umgesetzt werden, jedoch verbleiben nicht umgesetzen CF-Anteile in kommerziell vertriebenen Produkten. Der Prozess

bietet sowohl hinsichtlich der Kapazität als auch des CF-Umsatzes eine vielversprechende Option zur Verwertung CF-haltiger Abfälle. Die Auswirkungen von nicht umgesetzten CF auf die Produktqualitäten sowie die Weiterverarbeitbarkeit der Produkte sind zu prüfen. Weiterhin sollte die Aufbereitung der CF-haltigen Abfälle optimiert werden. Hier ist ein wesentlicher Faktor die vollständige Entfernung von GF, da diese den Prozess stören können.

Aktuell stehen vermehrt metallurgische Prozesse zur Verwertung von CF-haltigen Abfällen im Fokus der Forschung. Dabei reicht das Spektrum von Grundlagenuntersuchungen im Labormaßstab bis hin zu Untersuchungen in Technikumsanlagen. Erste Ergebnisse sind vielversprechend, jedoch ist eine Beurteilung aktuell nicht möglich, da die Ergebnisse der laufenden Projekte abzuwarten sind. Das Spektrum an verfügbaren Prozessen, Reaktorarten und Prozessbedingungen ist umfangreich. Eine Übertragung von Ergebnissen zur Eignung CF-haltiger Abfälle von einem Prozess, wie zum Beispiel dem Stahlrecycling, auf einen anderen Prozess ist nicht möglich. Es besteht ein großes Potential für weiterführende Forschungsprojekte, die sich gezielt mit einzelnen Prozessen beschäftigen.

6.4.3 Prozesse der sonstigen Verwertung von Carbonfasern

Bei den sonstigen Verwertungsprozessen ist für CFK die Verbrennung bzw. energetische Verwertung relevant. Verbrennungsprozesse standen insbesondere im UBA-Projekt (FKZ 3716 34 318 0) im Mittelpunkt der großtechnischen Untersuchungen.

6.4.3.1 Energetische Verwertung

Die Verwertung von CF-haltigen Abfällen in Abfallverbrennungsanlagen ist mit verschiedenen Problemen behaftet. So können Faserbruchstücke, die nicht vollständig im Brennraum umgesetzt werden, über den Gaspfad ausgetragen werden und zu Problemen in der Gasreinigung führen. Hierfür verantwortlich sind wahrscheinlich CF mit einer Länge > 1 mm (United States Environmetal Protection Agency (EPA) 1982), da ab dieser Länge die elektrisch leitfähige CF zu Defekten an elektrischen Bauteilen führen können. Besonders kritisch ist dieses Verhalten für Anlagen, bei denen ein Elektrofilter als erste Gasreinigungsstufe verbaut ist. Dies hat zu Folge, dass die Interessensgemeinschaft der thermischen Abfallbehandlungsanlagen in Deutschland (ITAD) empfiehlt, Mono-CF-Fraktionen nicht anzunehmen (RECYCLING magazin 2018). Weiterhin können Fasern in den Reststoffen verbleiben, die als Sekundärrohstoffe in Folgeprozessen oder als Füllstoffe im Baustoffbereich eingesetzt werden. Hier ist unklar, ob es zu einem Qualitätsverlust dieser Sekundärrohstoffe oder zu einer Gefährdung von Mensch und Umwelt kommen kann.

Die Möglichkeiten und Grenzen der energetischen Verwertung CF-haltiger Abfälle waren der Fokus des vom Umweltbundesamt geförderten Projekts (FKZ 3716 34 318 0), bei dem neben Grundlagenuntersuchungen im Labormaßstab sowie der Kampagne zur rohstofflichen Verwertung am Niederschachtofen bei der CaC_2-Herstellung (siehe Kapitel 6.4.2.2), vor allem großtechnische Versuchskampagnen an einer **Hausmüllverbrennungsanlage** (MVA), einer **Sonderabfallverbrennungsanlage** (SVA) sowie in einem **Zementwerk** stattgefunden haben (Quicker et al. 2021).

Dabei wurden an der MVA stündlich etwa 70 kg an trockenen Faserabfällen ohne Matrix sowie CF-Fluff mitverbrannt, was einem Massenanteil an CF von etwa 0,74 Ma.-% bezogen auf den in dieser Zeit insgesamt verbrannten Abfall entspricht. Die Untersuchung aller prozessspezifischen Reststoffe und des Abgaspfades ergab, dass etwa 63 Ma.-% der CF nicht umgesetzt werden konnten und zum Großteil über die Rostasche aus dem Brennraum ausgetragen wurden. Ein geringer Teil der Fasern wurde über den Gaspfad ausgetragen und konnte in der Kesselasche, bzw. im Filterstaub, nachgewiesen werden. Dabei wurden in allen Reststoffen CF gefunden, die

eine Geometrie nach Kriterien der WHO ausgebildet haben und demnach lungengängig sind. Die mehrstufige Gasreinigung der betrachteten MVA konnte alle Fasern zurückhalten, sodass kein Faseraustrag in die Umwelt erfolgte.

Bei der Messkampagne an der SVA wurden pro Stunde etwa 95 kg trockene CF-Abfälle ohne Matrix und Frässtaub eingesetzt, was einem Anteil von 1,2 Ma.-% bezogen auf die im Drehrohr aufgegebenen Abfallmenge entsprach. Die Untersuchung aller Reststoffe zeigte, dass etwa 38 % der CF nicht umgesetzt und nahezu vollständig über die Schlacke ausgetragen wurden. Die CF, die über den Abgaspfad in die Abgasreinigung gelangten, konnten vollständig zurückgehalten werden, sodass es zu keinem Eintrag der CF in die Umwelt kam. Analog zu den Messungen an der MVA konnten auch an der SVA in allen Reststoffen CF mit einer WHO-Geometrie gefunden werden.

Bei den Untersuchungen im Zementwerk wurde der CF-haltige Abfall über die Dosierungseinrichtung für den Fluff zugegeben. Dabei wurden etwa 100 kg_{CF}/h eingesetzt, was einem Anteil von 1 Ma.-% bezogen auf den Brennstoff entspricht, bzw. einem Anteil von 0,1 Ma.-% bezogen auf den Rohstoffeinsatz. Von den eingesetzten CF wurden etwa 31 Ma.-% im Klinker und etwa 1,1 Ma.-% in der Abgasreinigung wiedergefunden.

Als Fazit der Untersuchungen an den drei Großanlagen wurde festgehalten, dass die Prozessbedingungen der thermischen Abfallbehandlungsanlagen nach Stand der Technik nicht zur Verwertung von CF-haltigen Abfällen geeignet sind und deren unkontrollierter Eintrag in solche Anlagen vermieden werden sollte. Auch die Verwertung in Zementöfen kann aktuell nicht empfohlen werden, da für eine abschließende Bewertung dieses Prozesses weiterführende Untersuchungen zum Einfluss dieser Abfälle auf die Haupt- und Reststoffe erforderlich sind (Quicker et al. 2021).

Hier setzt das laufende Forschungsvorhaben „Methodische Untersuchungen von Verfahrensoptionen zur thermischen Entsorgung carbonfaserverstärkter Kunststoffe“ an. Das IGF-Vorhaben der Forschungsvereinigung DECHEMA wird über die AiF durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie gefördert und von der RWTH Aachen mit dem Lehr- und Forschungsgebiet Technologie der Energierohstoffe und dem Institut für Verfahrenstechnik und Umwelttechnik der Technischen Universität Dresden bearbeitet. Im Rahmen dieses Projekts werden Verbrennungsversuche in einem Rohrreaktor und einer zirkulierenden WS im Labor- und Technikumsmaßstab durchgeführt, um Grundlagen zur Entwicklung industrieller Verfahren zur thermischen Verwertung CF-haltiger Abfälle zu schaffen (DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V. 2020).

6.4.4 Prozesse der Beseitigung

Die Deponierung trockener CF ohne Kunststoffmatrix ist nach der Deponieverordnung (DepV) zulässig, da die Fasern als elementarer Kohlenstoff betrachtet werden können. Hierbei ist jedoch auf einen staubfreien Transport und eine staubfreie Lagerung zu achten. Für CFK-Abfälle ist eine Deponierung aufgrund des hohen Brennwertes der Kunststoffmatrix nach Anhang 3 Nr. 2 Satz 11 DepV jedoch verboten. Sollten die Fasern als gefährliche Fasern nach § 6 Absatz 6 Satz 2 Nr. 1 DepV eingestuft werden und eine Abtrennung der Matrix wirtschaftlich nicht zumutbar oder technisch nicht durchführbar sein, könnte eine abweichende Regelung möglich sein. Da Fasern nach dem Recycling einen marktfähigen Wertstoff darstellen, findet eine Deponierung nicht statt (Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) 2019).

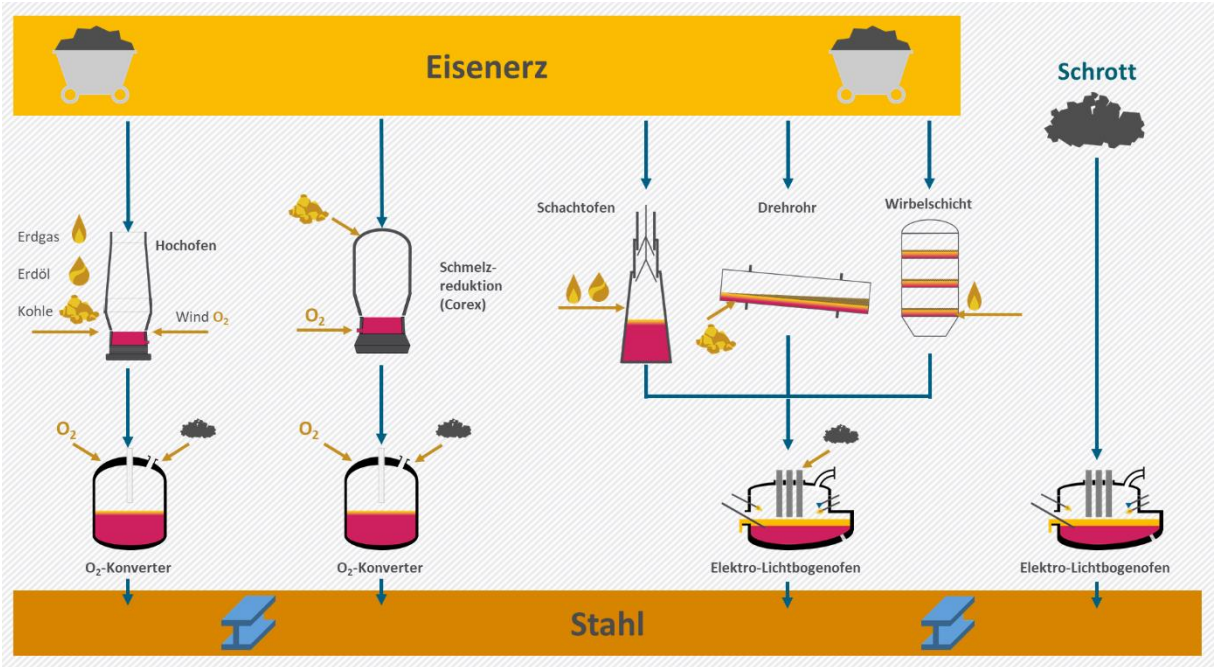
6.5 Verwertung von Metallen

Das Recycling von Metallen ermöglicht es, diese Wertstoffe ressourcenschonend und mit einer hohen Rezyklatqualität zu verwerten, womit diese Materialien am Ende des Produktlebenszyklus im Wirtschaftskreislauf verbleiben. Die Prozesse zum Recycling der in Rotorblättern eingesetzten Metallen werden nachfolgend beschrieben, wobei diese Prozesse meist schon seit Jahrzehnten industriell im Einsatz sind und dem Stand der Technik entsprechen. Dabei werden die Anforderungen an das Einsatzmaterial sowie der Einfluss von Verunreinigungen auf das rezyklierte Produkt berücksichtigt. Zusätzliche Informationen zu den Primärrouten zur Herstellung der jeweiligen Metalle, ein Vergleich der Massen- und Energieflüsse zwischen Primärroute und Recycling sowie zum Umgang mit den jeweils prozessspezifisch anfallenden Reststoffen sind in den Anhängen A.4.1, A.4.2 und A.4.3 zusammengefasst.

6.5.1 Stahl

Die globale Rohstahlproduktion lag 2019 bei etwa 1,87 Milliarden Tonnen. Davon wurden rund 630 Mio. t. durch Schrottrecycling hergestellt (Bureau of International Recycling 2020). In Deutschland wurden 2019 etwa 39,6 Mio. t hergestellt, wobei auch hier etwa 70 % aus Eisenerz über die Hochofenroute (Anhang A.4.1) erzeugt und die übrigen 30 % aus Schrott im Elektrolichtbogenofen recycelt wurden (Wirtschaftsvereinigung Stahl 2020b). Diese beiden Routen sind in Abbildung 173 dargestellt.

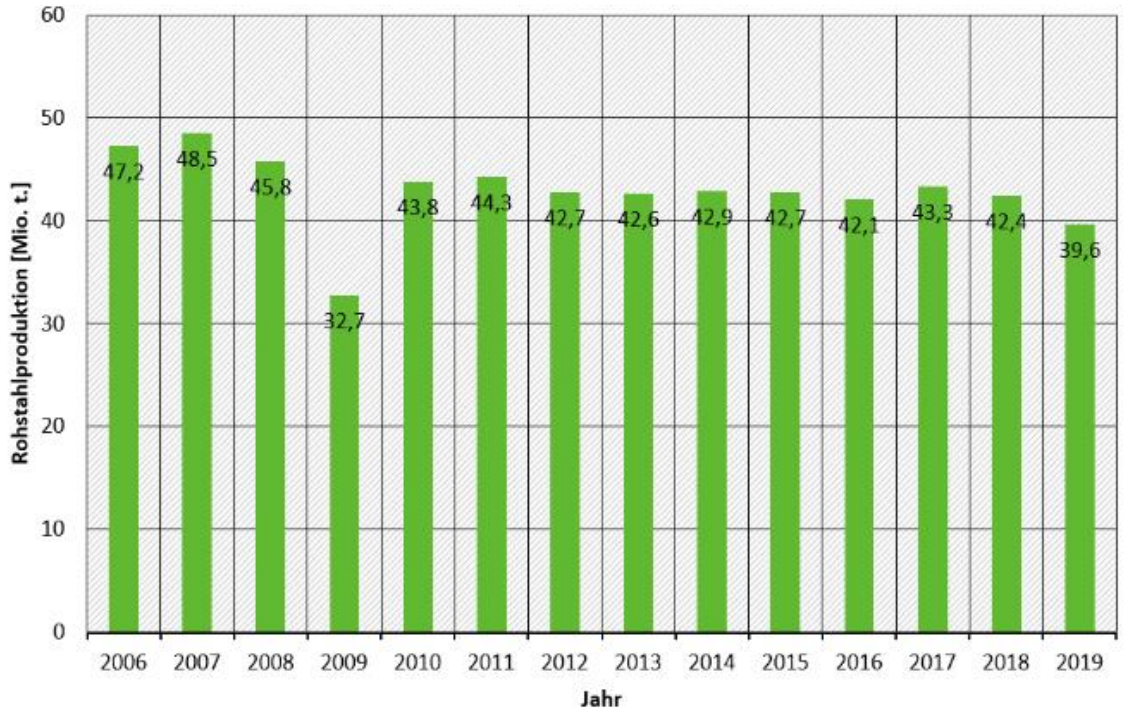
Abbildung 173: Produktionsrouten für Primärstahl aus Eisenerz sowie Sekundärstahl durch das Schrottrecycling im Elektrolichtbogenofen.



Quelle: Eigene Darstellung, KIT-ITC, nach Wirtschaftsvereinigung Stahl (2019).

Insgesamt weist die Rohstahlproduktion in Deutschland in den vergangenen Jahren einen konstanten Verlauf auf (Abbildung 174), wobei Deutschland innerhalb der EU der größte Stahlproduzent ist und weltweit an siebter Stelle liegt (Wirtschaftsvereinigung Stahl 2020b).

Abbildung 174: Jährliche Rohstahlproduktion in Deutschland zwischen 2006 bis 2019.



Quelle: Eigene Darstellung, KIT-ITC, nach Wirtschaftsvereinigung Stahl (2020b).

Gegenüber der Primärroute zur Stahlherstellung im Hochofen schont die Sekundärroute[12], das Stahlrecycling, Ressourcen und emittiert bedeutend weniger CO_2. So werden pro Tonne recyceltem Stahl 1,5 t Eisenerz und 0,65 t Kohle gegenüber der Primärroute eingespart (Wirtschaftsvereinigung Stahl 2020a). Aber auch der kumulierte Energieaufwand (KEA) sowie die Emissionen an CO_2, CO, verschiedenen Schadgasen und Stäuben liegen beim Stahlrecycling deutlich unterhalb der Werte der Primärroute (Tabelle 68). So beträgt die Einsparung des KEA 54 %, die Minderung der SO_2-Freisetzung beträgt 86 %, jeweils bezogen auf die Primärroute. Detaillierte Informationen zum Vergleich des KEA und der Massenströme beider Routen sind in Anhang A.4.1 aufgelistet.

Trotz dieser hohen Recyclingquote entfielen im Jahr 2020 etwa 28 % der deutschen industriellen CO_2-äquivalenten Emissionen auf die Stahlproduktion, somit ist diese Branche vor Raffinerien und der Zementklinkerherstellung der größte CO_2-Emittent (Deutsche Emissionshandelsstelle im Umweltbundesamt 2021). Daher hat eine wachsende Sekundärstahlindustrie einen drastischen Effekt auf diese Emissionen und somit auch auf den Klimawandel (Daehn et al. 2017)[13].

[12]Nicht zu verwechseln mit der Sekundärmetallurgie zur Nachbehandlung und Veredelung von Stahlschmelzen.

[13]Weitere Möglichkeiten, CO_2-Emission weiter zu verringern, sind neue Prozesse und alternative Einsatzstoffen für die Primärstahlproduktion, wie beispielsweise der Einsatz von Wasserstoff als Reduktionsmittel anstelle von Kohle bzw. Koks (Wirtschaftsvereinigung Stahl 08/2020).

Tabelle 68: Ergebnisse zur ganzheitlichen Bilanzierung von Stahl aus der Primärroute (Hochofen) gegenüber von Stahl aus dem Recycling (Elektrolichtbogenofen).

		Hochofenroute	Recycling
KEA	[MJ/tStahl]	18.696	8.691
CO_2	[kg/tStahl]	1.712	623
CO	[g/tStahl]	1.351	411
NO_X	[g/tStahl]	3.319	1.373
SO_2	[g/tStahl]	10.222	1.433
CH_4	[g/tStahl]	8.121	1.625
NMVOC*	[g/tStahl]	227	131
N_2O	[g/tStahl]	257	48
Staub	[g/tStahl]	608	150

*NMVOC = Non Methane Volatile Organic Compounds

Quelle: Corradini et al. (1999) .

6.5.1.1 Stahlrecycling im Elektrolichtbogenofen

Neben der primären Prozessroute ist das Stahlrecycling in Deutschland von großer Bedeutung, da der Stahlbedarf weder vollständig durch die Primärproduktion gedeckt werden kann (Hildebrandt 2019; Broadbent 2016), noch aus wirtschaftlichen oder umweltschutztechnischen Gründen sinnvoll wäre.

Dabei treten durch das Recycling im Idealfall weder Qualitäts- noch Eigenschaftsverluste auf, wodurch ein unbegrenztes Recycling möglich ist. Limitationen gibt es ausschließlich durch den Eintrag von Verunreinigungen und unerwünschten Elementen (Wirtschaftsvereinigung Stahl 2017, 2018, 2020a; Worrel und Reuter 2014; Broadbent 2016). Daher ist die Herausforderung des Stahlrecyclings das Entfernen von Fremdelementen aus dem eingesetzten Schrott (Savov et al. 2003).

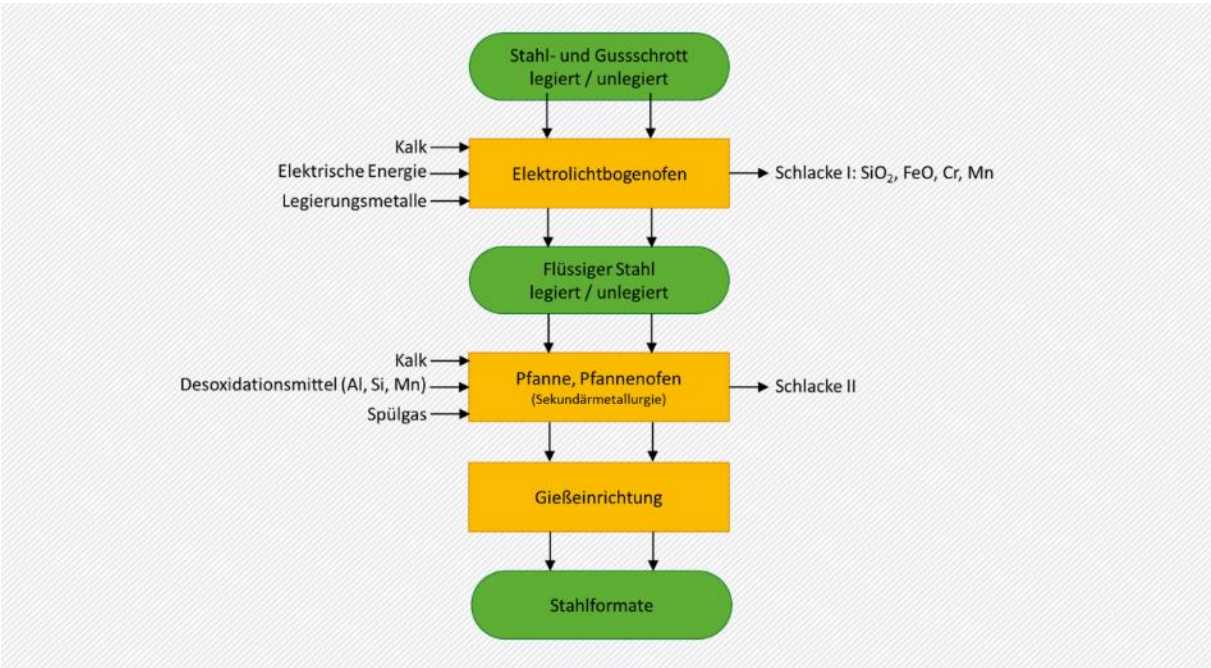
Generell gilt, dass Stahl mit einem geringeren Anteil an Rest- bzw. Fremdelementen einen höheren Marktwert aufweist (Broadbent 2016) und zusätzlich die Zusammensetzung des Stahls inkl. der Art und Anteile an Legierungselementen die Auswahl des Recyclingverfahrens sowie die Qualität des Rezyklats bestimmen. Elemente wie Nickel und Chrom können den Schrottpreis erhöhen, Elemente wie Zinn und Kupfer sollten aufgrund ihrer negativen Effekte im Recyclingstahl und somit im eingesetzten Schrott minimiert werden (Martens und Goldmann 2016). Weitere wichtige Faktoren sind mögliche Beschichtungen, welche den Recyclingprozess erschweren oder gar die Qualität des Recyclingstahls mindern (Martens und Goldmann 2016).

Das Recycling von Stahl bzw. eisenhaltigem Schrott ist in Abbildung 173 dargestellt und beinhaltet im Wesentlichen das Schmelzen und Aufreinigen der Einsatzstoffe im Elektrolichtbogenofen (engl. Electric Arc Furnace - EAF) sowie die Nachbehandlung der Schmelze in einem Pfannenofen und das Gießen des recycelten Stahls (Broadbent 2016; Worrel und Reuter 2014; Wirtschaftsvereinigung Stahl 2019).

Das Fassungsvermögen industriell eingesetzter EAF bezieht sich i.d.R. auf die Flüssigstahlmenge, die pro Batch erzeugt werden kann, das sog. Abstichgewicht. Kleine Elektrolichtbogenöfen

haben ein Abstichgewicht von 5 Tonnen, wohingegen das Abstichgewicht der weltweit größten Öfen bis zu 300 Tonnen betragen kann.

Abbildung 175: Vereinfachtes Verfahrensfließschema zum Recycling von Stahl- und Gussschrott im Elektrolichtbogenofen inkl. der wesentlichen Prozessschritte (orange) und Einsatzstoffe, bzw. Produkte (grün).

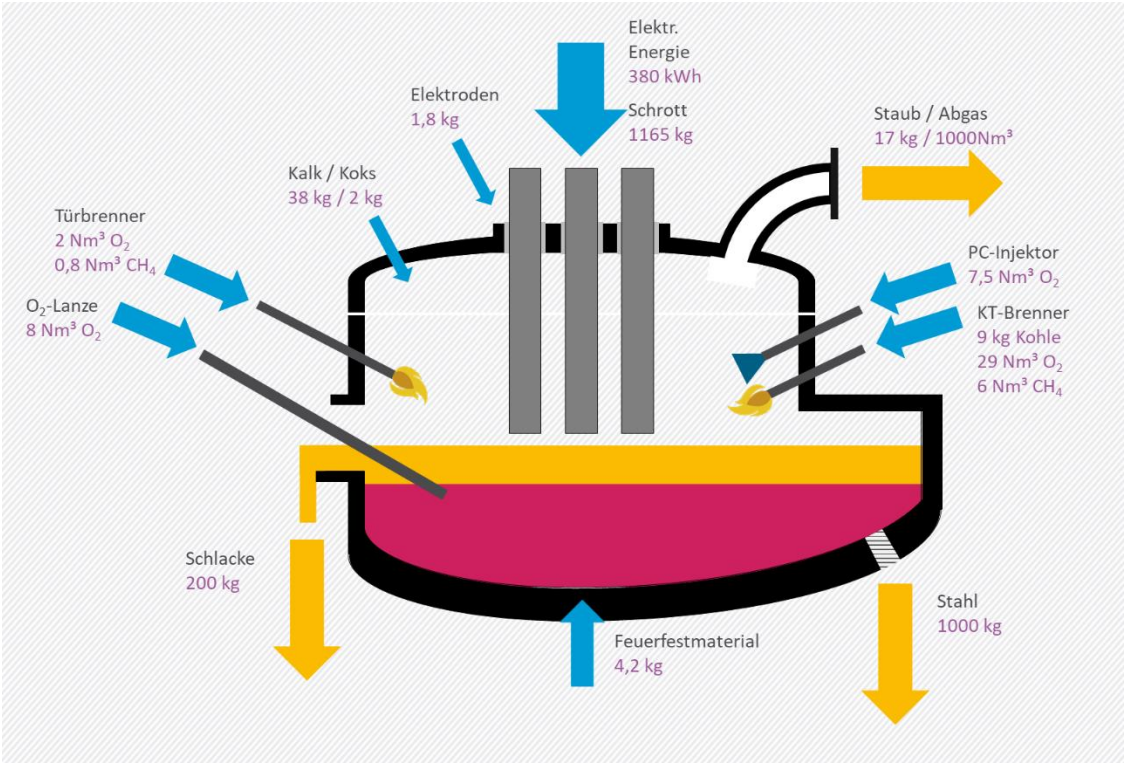


Quelle: Eigene Darstellung, KIT-ITC, vereinfacht und gekürzt nach Martens und Goldmann (2016).

Ausgangsstoffe für das Stahlrecycling im EAF sind Roheisen, Eisenschwamm, Eisenschrotte, nichtmetallische Zuschläge und Legierungsmittel. Diese Materialien werden unter Zugabe von Kalk (CaO) und Flussspat (CaF_2) im EAF geschmolzen. Durch Einblasen von Sauerstoff werden die meisten Verunreinigungen oxidiert und bilden mit dem Kalk und dem Flussspat eine flüssige Schlacke, wobei dieser Prozess der selektiven Oxidation als „Frischen" bezeichnet wird (Worrel und Reuter 2014; Martens und Goldmann 2016). Die Temperaturen beim Frischen müssen über dem Schmelzpunkt von Stahl liegen, der etwa 1.600 °C beträgt (Martens und Goldmann 2016).

Durch die Oxidation unerwünschter Begleitstoffe und die damit verbundene Überführung der Oxide in die Schlacke wird nicht die gesamte eingesetzte Schrottmenge als Recyclingstahl wiedergewonnen (Abbildung 176). Die Verluste finden sich in den Nebenprodukten, vor allem der Schlacke, aber auch den Stäuben (Broadbent 2016; Worrel und Reuter 2014). Durch die reduzierende Atmosphäre im EAF kann die Verschlackung wertvoller Legierungsmetalle vermindert werden, weshalb dieses Verfahren bevorzugt zum Schmelzen von legierten Schrotten eingesetzt wird (Martens und Goldmann 2016).

Abbildung 176: Energie- und Stoffflüsse beim Stahlrecycling im Elektrolichtbogenofen, bezogen auf eine Tonne Rohstahl.



Quelle: Eigene Darstellung, KIT-ITC, nach Krassnig et al. (2007).

Nach dem Frischen im EAF wird der flüssige Stahl in Stahlpfannen überführt und nachbehandelt. Von großer Bedeutung ist dabei die Reduktionsphase zum Abbau von Sauerstoff und Schwefel, und weitere Verfahren der Sekundärmetallurgie können nachgeschaltet werden (Worrel und Reuter 2014; Martens und Goldmann 2016). Informationen zum Umgang mit den prozessspezifischen Reststoffen des Stahlrecyclings sind in Anhang A.4.1 dargestellt. Dabei handelt es sich meist um etablierte Prozesse, in denen die Reststoffe sicher und schadlos weiterverarbeitet werden. Eine weiterführende Betrachtung findet daher an dieser Stelle nicht statt.

6.5.1.2 Einfluss von Verunreinigungen auf die Qualität des Recyclingstahls

Verschiedene Legierungselemente können während des Recyclings im EAF nahezu problemlos aus dem Schrott bzw. der Stahlschmelze entfernt werden. Dazu zählen Kohlenstoff, Wolfram, Phosphor, Chrom, Mangan, Vanadium, Silicium, Titan, Aluminium, Magnesium und Calcium, da diese eine höhere Sauerstoffaffinität als Eisen aufweisen und somit durch die selektive Oxidation im EAF verschlackt werden. Weitere Bestandteile wie Zink und Cadmium werden durch ihre hohen Dampfdrücke als Metalldampf verflüchtigt und reichern sich in den Stäuben an (Martens und Goldmann 2016).

Weiterhin weisen einige Legierungselemente wie Kupfer, Nickel, Kobalt und Zinn eine niedrigere Sauerstoffaffinität als Eisen auf, weshalb sie nicht durch Oxidation aus der Schmelze entfernt werden können. Im internationalen Sprachgebrauch werden sie daher oft als „*tramp elements*“ bezeichnet und bisher gibt es keine kommerziellen Verfahren zu Entfernung dieser Elemente aus Stahlschrotten. Vor allem Kupfer und Zinn gehören zu den kritischsten Verunreinigungen, da sie die Duktilität des Stahls herabsetzen, wodurch es zur Rissbildung in der Oberfläche kommen kann, dessen Ausprägung von der Kupferkonzentration abhängt (Daehn et al. 2017; Savov et al. 2003; Worrel und Reuter 2014). Dieser negative Effekt wird durch

weitere Legierungselemente beeinflusst. So verstärken Zinn, Antimon und Arsen den negativen Einfluss von Kupfer, wohingegen Nickel diesen reduziert (Savov et al. 2003).

Auch Schwefel, der über Schrottverunreinigungen wie Gummi, Autoreifen, Öle, eingetragen werden kann, kann nur durch Zugabe von Kalk und nicht durch eine reine Oxidation aus der Schmelze entfernt werden. Da diese Elemente einen negativen Einfluss auf die Qualität des Stahls haben, ist deren zulässiger Anteil streng reglementiert und darf beispielsweise 0,025 % nicht überschreiten (Martens und Goldmann 2016).

Um einer Anreicherung mit diesen Elementen sowie anderen Störstoffen im recycelten Stahl entgegenzuwirken, können verschiedene Maßnahmen getroffen werden, darunter eine recyclinggerechte Konstruktion (geeignete Materialauswahl, Fügetechniken, etc.), geeignete Sortierprozesse, insbesondere zur Vorsortierung legierter Schrotte sowie die Verdünnung mit Primäreisen während des Prozesses (Martens und Goldmann 2016; Daehn et al. 2017).

6.5.2 Aluminium

Das Recycling von Aluminium hat in den letzten Jahren zunehmend an Bedeutung gewonnen, da einerseits die Ressourcen zur Erzeugung von Primäraluminium (Anhang A.4.1) innerhalb Europas begrenzt sind und andererseits das Recycling gegenüber der Primärroute einen deutlich geringeren Energiebedarf und niedrigere Schadstoffemissionen besitzt (Capuzzi und Timelli 2018; Das et al. 2010; Antrekowitsch et al. 2013). So wurden im Jahr 2014 mehr als 3 Mio. t Sekundäraluminium in Europa produziert (Capuzzi und Timelli 2018) und 2018 waren es bereits mehr als 4,9 Mio. t (European Aluminium 2019). Deutschlandweit wurden zwischen 2000 und 2019, mit Ausnahme von 2009, jährlich etwa 1.000 bis 1.400 kt Aluminium erzeugt, dabei lag der Anteil an Recyclingaluminium 2019 bei 58 % (GDA - Gesamtverband der Aluminiumindustrie e.V. (GDA) 2020).

Der Energiebedarf der Herstellung von Primäraluminium beträgt pro Tonne etwa 45 kWh inkl. Energieverluste und Transport (Das et al. 2010). Wirtschaftlich machen vor allem die Stromkosten mit 38 % einen wesentlichen Faktor aus (European Aluminium 2019). Beim Aluminiumrecycling kann der KEA um etwa 92 % gesenkt werden, auch die Reduktion der gasförmigen Emissionen und der Stäube beträgt mindestens 90 % (Tabelle 69). Detailliertere Informationen zu den KEA und Massenflüssen beider Routen sind in Anhang A.4.2 aufgeführt.

Zusätzlich werden bei der Herstellung einer Tonne Sekundäraluminium 8 t Bauxit, 14 MWh Energie, 6.300 Liter Öl und 7,6 m^3 Deponiefläche eingespart (Capuzzi und Timelli 2018).

Dabei nimmt die Qualität des rezyklierten Aluminiums gegenüber Primäraluminium nicht ab, solange keine Verunreinigungen, wie z. B. Fremdmetalle, in den Recyclingprozess eingetragen werden oder die zulässigen Mengen an Legierungsstoffen nicht überschritten werden (Worrel und Reuter 2014; GDA - Gesamtverband der Aluminiumindustrie e.V. (GDA); GDA - Gesamtverband der Aluminiumindustrie e.V. (GDA) 2010).

Tabelle 69: Ergebnisse zur ganzheitlichen Bilanzierung von Aluminium-Mix frei Halbzeugwerk (Deutschland) aus der Primärroute gegenüber dem Recycling.

		Primäraluminium	Recycling-Aluminium
KEA	[MJ/t]	204.050	15.694
CO2	[kg/t]	11.687	860
CO	[g/t]	26.683	834
NOX	[g/t]	26.769	1.496
SO2	[g/t]	15.139	625
CH4	[g/t]	19.907	2.063
NMVOC14	[g/t]	2.538	127
N2O	[g/t]	531	23
Staub	[g/t]	1.754	96

Quelle: Corradini et al. (1999).

6.5.2.1 Recycling von Aluminium in Schmelzprozessen

Das Recycling von reinem Aluminium und Aluminiumlegierungen erfolgt schmelzmetallurgisch, wobei zwischen Remeltern (Umschmelzwerke) und Refinern (Schmelzhütten) unterschieden wird. Die in den verschiedenen Prozessen entstehenden Reststoffe können teilweise weiterverwertet werden (Anhang A.4.3).

Die wesentliche Herausforderung des Aluminiumrecyclings ist die Erzielung einer gleichbleibend hohen Rezyklatqualität, da der Aluminiumschrott aus einer Vielzahl verschiedener Quellen kommt und damit unterschiedliche Zusammensetzungen und Verunreinigungen aufweist (Capuzzi und Timelli 2018; Das et al. 2010; Martens und Goldmann 2016). Weiterhin ist die Entfernung unerwünschter Elemente und Verbindungen aus dem Aluminium aufgrund seines thermodynamischen Verhaltens im Vergleich zu anderen Metallen erschwert (David und Kopac 2015).

Um daraus entstehende negative Effekte zu minimieren, kann das Rezyklat mit Primäraluminium gemischt werden, sodass die Konzentrationen der Verunreinigungen gesenkt werden können (David und Kopac 2015; Capuzzi und Timelli 2018). Weiterhin ist es möglich, für bestimmte Anwendungen Produkte mit verminderter Qualität herzustellen, was einem Downcycling entspricht. Beide Methoden sind weder ökologisch noch wirtschaftlich sinnvoll, weshalb die zu recycelnden Altschrotte unabhängig von der nachfolgenden Behandlung zunächst vorsortiert werden, um Verunreinigungen wie Kupfer oder Eisen abzutrennen. Dabei ist die Wahl der einzusetzenden Aufbereitungstechniken abhängig von der Art und Zusammensetzung des Abfalls, und damit meist verbunden mit dem vorhergehenden Einsatz des Aluminiumabfalls (Martens und Goldmann 2016).

Die Wahl des schmelzmetallurgischen Recyclingverfahrens ist abhängig von den Legierungsbestandteilen, da sich die chemische Zusammensetzung sowie die Eigenschaften verschiedener Aluminiumlegierungen erheblich voneinander unterschieden. So wird sauberer Knetlegierungsschrott in Remeltern zu neuwertigen Knetlegierungen geschmolzen und nachfolgend weiterverarbeitet, Gussschrott und verschmutzter Schrott (Altschrott) hingegen

[14]Non Methane Volatile Organic Compounds

werden in Refinern unter Zugabe von Schmelzsalzen geschmolzen (Martens und Goldmann 2016; Worrel und Reuter 2014).

Das Recycling von Aluminiumschrott mit geringer Verunreinigung sowie von reinen Produktionsabfällen erfolgt in **Remeltern**, was meist ohne Zugabe von Schmelzsalz geschieht, wodurch eine geringe Menge an Krätze[15] als Nebenprodukt anfällt und verschiedene wichtige Legierungsmetalle wie beispielsweise Magnesium in der Schmelze verbleiben.

Zum Schmelzen des Schrotts können öl- oder gasbeheizte Ein- oder Mehrkammerherdöfen mit einem Fassungsvermögen im Bereich von 5 bis 100 t sowie Induktionsöfen eingesetzt werden, die auf eine Temperatur von etwa 950 °C geheizt werden. Dabei werden Mehrkammeröfen bei organischen Verunreinigungen (z. B. Beschichtungen auf dem Aluminium) eingesetzt, und bei Bedarf können Aufbereitungsverfahren wie Spülgasbehandlung mit Argon-Chlor-Gemischen nachgeschaltet werden. Die Entnahme der Schmelze erfolgt beispielsweise durch einen Abstich, die Entnahme der Krätze erfolgt durch eine seitliche Öffnung.

Die entstehenden Abgase werden nachbehandelt; dies beinhaltet eine Entstaubung, eine Abgasreinigung und die Vorwärmung der Verbrennungsluft (Martens und Goldmann 2016). Die Abgasreinigung in Remeltern erfolgt mittels Gewebefiltern und Trockensorptionsverfahren oder Flugstromverfahren. Ein Gemisch aus Kalkhydrat und Aktivkohle bzw. Aktivkoks wird dem Abgas als Adsorbens zugegeben und nachfolgend das beladene Adsorbens und auftretende Stäube mittels Gewebefilter abgeschieden. Dabei bildet sich an der Oberfläche des Gewebefilters eine alkalische Schicht, wodurch saure Abgasbestandteile (HCl, HF, Cl_2) adsorbiert und abgetrennt werden. Die anfallenden Filterstäube bestehen aus einer Mischung von organischen Bestandteilen des geschmolzenen Materials, durch den Abgasstrom mitgerissenen Feinanteilen des geschmolzenen Materials, Teilen des verdampften oder hydrolysierten Salzes und des in der Abgasnachbehandlung zugegebenen Kalkhydrat-Gemisches. Nach der Abtrennung werden die Filterstäube auf Sonderdeponien bzw. Untertage abgelagert (Boin et al. 2000).

Schrottgemische, Schrotte mit Verunreinigung und Krätzegröbe[16] werden in **Refinern** verarbeitet. Dabei wird der Schrott meist in einem Drehtrommelofen unter Zugabe von etwa 500 kg Schmelzsalz pro Tonne Schrott geschmolzen, wobei als Nebenprodukte Salzschlacke und Salzkuchen anfallen. Dabei wird bei stark verunreinigten Schrotten eine größere Menge an Schmelzsalz zugegeben. Das Fassungsvermögen des Drehtrommelofens liegt zwischen 10 bis 60 t. Beim Schmelzen von schwach verunreinigtem Schrott reicht ein geringerer Anteil an Schmelzsalz aus, wobei das Fassungsvermögen solcher Öfen bei 6 bis 10 t liegt (Martens und Goldmann 2016).

Die Schmelzsalze werden dem Prozess aufgrund der hohen Sauerstoffaffinität von Aluminium zugegeben, um die Bildung von Aluminiumoxiden und den damit einhergehenden Metallverlust zu minimieren (Capuzzi und Timelli 2018; Antrekowitsch et al. 2013). Die verwendeten Salze bestehen meist aus 65 bis 75 % NaCl und 25 bis 30 % KCl, zusätzlich werden 13 % verschiedene Fluoride (Ca-, Na-, K-, Al-Fluorid) sowie Kryolith als Flussmittel eingesetzt (Antrekowitsch et al. 2013).

Der Schmelzvorgang findet bei 800 °C unter ständiger Rotation des Schmelzofens statt (Worrel und Reuter 2014). Aufgrund der hohen Konzentration an Verunreinigungen ist eine Abgasnachbehandlung erforderlich, da die Abgase neben CO_2 und CO auch Reste von Kohlenwasserstoffen, SO_2, Dioxine, oxidierte Metallpartikel sowie verschiedene Chloride und

[15]Verunreinigungen, die beim Schmelzen von Metall und der Metalllegierungen auftreten können. Sie haben einen höheren Schmelzpunkt als das Metall und liegen daher als Feststoff vor.

[16]Metall aus der Krätzeaufbereitung.

Fluoride ($MgCl_2$, $AlCl_3$, AlF_3) enthalten, aus denen mittels Pyrohydrolyse MgO, Al_2O_3, HCl und H_2F_2 entstehen können. Daher wird dem Abgas ein Kalkhydratpulver zugegeben, sodass im Gewebefilter (wie zuvor beschrieben) durch Adsorption der Schadgasfraktionen und der Rückhaltung der partikelförmigen Fraktion das Gas gereinigt wird. Aufgrund der toxischen Zusammensetzung zählen die Filterstäube zu überwachungspflichtigen Abfällen und werden auf Sonderdeponien, bzw. Untertage abgelagert (Capuzzi und Timelli 2018; Boin et al. 2000; Antrekowitsch et al. 2013).

Zur Veredelung des geschmolzenen und gereinigten Aluminiums können weitere Nachbehandlungsschritte wie eine Argon-Chlor-Spülgasbehandlung oder Legierungseinstellungen nachgeschaltet werden (Martens und Goldmann 2016).

Neben dem Drehtrommelofen gibt es weitere Schmelzöfen mit unterschiedlichen Funktionsweisen sowie Vor- und Nachteilen (Tabelle 70), wobei die Auswahl von der Art und Geometrie des Schrottes, dessen Qualität, vorhandenen Verunreinigungen, dem Schmelzvolumen, den Betriebsbedingungen, den Produktionskosten und der gewünschten Produktqualität abhängen. Dabei sind die zwei wichtigsten Parameter die Metallausbeute und das Produktions- beziehungsweise das Schmelzvolumen (Capuzzi und Timelli 2018).

Tabelle 70: Vor- und Nachteile verschiedener Ofentypen des Aluminiumrecyclings.

Ofentyp	Vorteile	Nachteile
Elektroofen	Geringere Abgasemissionen Weniger Schlacke Bessere Metallqualität Geringerer Metallverlust	Elektrizität meist teurer als fossile Brennstoffe Geringes Schmelzvolumen
Flammofen	Hohes Schmelzvolumen Geringe Betriebs- und Erhaltungskosten	Hohe Metalloxidationsrate Geringe Energieeffizienz Hoher Platzbedarf
Drehrohrofen	Schneller und effizienter als Flammöfen Höhere Schmelzraten Weniger Emissionen Verbesserte Metallzusammensetzung Geringerer Energieträgerverbrauch	Hohe Installationskosten Hoher Erhaltungsaufwand

Quelle: Eigene Darstellung und Übersetzung, KIT-ITC, nach Capuzzi und Timelli (2018).

Eine alternative Methode der Produktion von Sekundäraluminium ist das **Solid State Recycling**, das für sortenreinen Schrott geeignet ist, da hierbei keine Entfernung von Verunreinigungen möglich ist (Duflou et al. 2015). Die Verwertung erfolgt durch Extrusion aus festen Massen, die bei hohem Druck durch eine formgebende Öffnung gepresst werden. Bei der Heiß-Extrusion wird der Aluminiumschrott oberhalb der Rekristallisationstemperatur, die bei etwa 40 bis 50 % der Schmelztemperatur liegt, extrudiert. Das Verfahren hat den Vorteil, dass im Gegensatz zu den schmelzmetallurgischen Prozessen keine Metallverluste vorliegen, was besonders bei kleinen Teilen mit großen Oberflächen-Massen-Verhältnissen mit entsprechend hohen Metallverlusten durch Oxidation entscheidend sein kann.

Informationen zum Umgang mit den prozessspezifischen Reststoffen des Aluminiumrecyclings sind in Anhang A.4.3 dargestellt. Dabei handelt es sich meist um etablierte Prozesse, in denen die Reststoffe sicher und schadlos weiterverarbeitet werden. Eine weiterführende Betrachtung findet daher an dieser Stelle nicht statt.

6.5.2.2 Einfluss von Verunreinigungen auf die Rezyklatqualität

Verunreinigungen beeinflussen die physikalischen Eigenschaften des Rezyklats (Tabelle 71), darunter die Festigkeit, die Duktilität, die Korrosionsrate und die elektrische Leitfähigkeit (David und Kopac 2015; Dewan et al. 2011).

Tabelle 71: Typische Verunreinigungen und deren Einfluss auf die Qualität des rezyklierten Aluminiums.

Verunreinigungen	Effekte auf Al-Eigenschaften und Produktionsprozesse
Titan, Vanadium, Chrom, Zirkonium	Verschlechterung der elektrischen Leitfähigkeit; Beeinträchtigung der Kaltumformeigenschaften
Magnesium	Verbesserung mechanischer Eigenschaften; u.U. Störeffekte auf Elektrolyten im Hall-Hérault-Prozess
Calcium	Heißrissformung (während Gießprozess); u.U. Störeffekte auf Elektrolyten in Hall-Hérault-Prozess
Natrium	Schädlich wenn Wasserstoff vorhanden ist; kann Herstellungsfehler (Kantenrisse) und Heißrisse verursachen
Lithium	Erhöhung der Korrosionsrate von Al-Folien; kann Heißrissbildung verursachen
Eisen	Verursacht Stresserhöhung und Punkte schwacher Kohärenz; Verschlechterung mechanischer Eigenschaften
Nickel	Erhöhung von Kriechbeständigkeit bei hohen Temperaturen; Reduziert Korrosionsbeständigkeit

Quelle: Eigene Darstellung und Übersetzung, KIT-ITC, nach Dewan et al. (2011).

Besonders Eisen ist eine kritische Verunreinigung, da es schlecht zu entfernen ist und innerhalb des Aluminiums spröde intermetallische Verbindungen bildet, welche die mechanischen Eigenschaften negativ beeinflussen (Capuzzi und Timelli 2018). Bisher gibt es kein kommerzielles Verfahren zur Entfernung von Eisen aus Aluminiumschmelzen (Dewan et al. 2011). Übergangsmetalle (Titan, Vanadium, Chrom, Zirkonium) können durch Zugabe von Bor aus der Schmelze entfernt werden, da Bor mit diesen Metallen unlösliche Borid-Verbindungen bildet, die abgetrennt werden können. Alkali- und Erdalkalimetalle wie Lithium, Natrium, Kalium, Calcium und Magnesium können über eine Spülgasbehandlung mit Chlor bzw. einem Argon-Chlor-Gemisch oder durch Zugabe von Aluminiumfluorid (AlF_3) entfernt werden (Dewan et al. 2011).

Auch organische Beschichtungen haben einen Einfluss auf die Prozessführung und die Rezyklateigenschaften, da Kunststoffe und andere organische Stoffe nicht vollständig verbrennen, sondern unter den Prozessbedingungen pyrolysiert werden und der dabei entstehende Kohlenstoff zu Aluminiumkarbid reagieren kann (Martens und Goldmann 2016). Diese Karbide sind schädlich für das Rezyklat, da sie zu Rissbildungen führen können. Zudem sind Aluminiumkarbid-Cluster hochreaktiv und können mit Feuchtigkeit aus der Luft zu Aluminiumhydroxid ($Al(OH)_3$) reagieren, was zu einer Volumenausdehnung und folglich zu Oberflächendefekten führen kann (Aarnæs 2018). Möglichkeiten zur Entfernung von Aluminiumkarbid sind Wiedereinschmelzung und eine (Argon-) Spülgasbehandlung (Aarnæs 2018), u.U. können die Karbide auch in Form von Krätze abgetrennt werden (Paulitsch et al. 2013). Eine weitere Möglichkeit ist die Spülgasbehandlung der Aluminiumschmelze mit CO_2, O_2

oder H_2O, wodurch Al_2O_3 bzw. $Al(OH)_3$ gebildet wird und als Feststoff ausfällt, der abgetrennt werden kann (Aarnæs 2018).

Weiterhin können die in Lacken bzw. Beschichtungen eingesetzten Pigmente wie TiO_2 oder ZnO die Schmelze ebenfalls verunreinigen. Diese Metalloxide werden in der Schmelze reduziert, und Metalle mit niedrigem Schmelzpunkt wie Blei, Zink und Antimon verbleiben in der Aluminiumschmelze, Metalle mit hohem Schmelzpunkt werden über die Reststoffe ausgetragen (Martens und Goldmann 2016).

6.5.2.3 Anforderungen an das Einsatzmaterial

Um eine optimale Prozessführung zu gewährleisten bzw. ein optimales Rezyklat zu erhalten, müssen die Einsatzstoffe bestimmte Anforderungen erfüllen. Beispielsweise sind die Abmessungen der Schrotte wichtig für eine gute Ofenbeschickung. Dabei sollten sie allerdings nicht zu feinteilig sein, da feinteilige Materialien wie Späne und Folien eine große Oberfläche aufweisen. Diese oxidiert und die Oxidschicht vermindert das Schmelzen und Zusammenfließen der Schrotte und reduziert somit die Metallausbeute.

Um die Recyclingprozesse optimal auf bestimmte Schrottsorten auszulegen, haben sich Handels-Usancen (Übereinkünfte) zwischen Schrotthändlern und Schmelzhütten etabliert (Martens und Goldmann 2016). In diesen Usancen werden Abmessungen, Gewichte sowie zulässige Inhaltsstoffe definiert. Handelsübliche Geometrien und Gewichte für Nichteisenmetallschrott sind in Tabelle 72 dargestellt (Verband Deutscher Metallhändler e.V. 2012).

Tabelle 72: Typische Abmessungen für Nichteisenmetallschrott.

Bezeichnung	maximale Abmessung	maximales Gewicht
Ofenrecht	100 cm x 50 cm x 40 cm	200 kg
Tiegelrecht	40 cm x 40 cm x 40 cm	50 kg
Kleinstückig	< 10 mm x 10 mm x 0,2 mm	-
Feines	Bei Leichtmetallen: Material, das durch ein 20-maschiges Sieb geht (Maschenweite 0,84 mm).	Bei Leichtmetallen: Material, das durch ein 20-maschiges Sieb geht (Maschenweite 0,84 mm).

Quelle: Verband Deutscher Metallhändler e.V. (2012).

Zusätzlich werden in diesen Usancen verschiedene Arten von Aluminiumschrott definiert, welche bestimmte Eigenschaften erfüllen müssen (Tabelle 73). Grundsätzlich sollten alle Schrotte frei von Kunststoffen und frei von beschichtetem Material sowie anderen Fremdbestandteilen sein. Weitere Aluminiumschrott-Sorten sind in der Literatur zu finden (Verband Deutscher Metallhändler e.V. 2012).

Tabelle 73: Klassifizierung verschiedener Aluminiumschrottsorten.

Schrottsorte	Eigenschaften	Toleranz an Fremdstoffen
Neuer Aluminiumblechschrott	min. 99 % Al; Mindeststärke 0,3 mm	1 % Öl, Fett und Staub
Neuer Blechschrott einer spezifischen Legierung	Mindeststärke 0,3 mm	1 % Öl, Fett und Staub
Neuer Aluminiumlegierungsblech-schrott mit niedrigem Cu-Gehalt	max. 0,2 % Cu; max. 0,2 % Zn	1 % Öl, Fett und Staub

Schrottsorte	Eigenschaften	Toleranz an Fremdstoffen
Neuer gemischter Aluminiumlegierungs-Blechschrott (aus mehreren Legierungen)	Mindeststärke 0,3 mm	1 % Öl, Fett und Staub
Altschrott von Walzaluminium I	Frei von Al-Cu & Al-Zn Legierungen; max. 20 % lackiertes Material; frei von losen Gussstücken, Jalousieschrott, Flaschenkapseln, Tuben und anderen metallischen und nichtmetallischen Bestandteilen; frei von Brecher- und Schredderschrott,	2 % nichtmetallische Fremdbestandteile
Altschrott von Walzaluminium II	Frei von Al-Cu & Al-Zn Legierungen; max. 30 % lackiertes Material; frei von losen Gussstücken, Jalousieschrott, Flaschenkapseln, Tuben und anderen metallischen und nichtmetallischen Bestandteilen; frei von Brecher- und Schredderschrott	1 % Eisen; 2 % nichtmetallische Bestandteile
Reiner Aluminiumblechschrott	unlegiertes Al; min. 99,5 %; Mindeststärke 0,3 mm	1 % Öl, Fett und Staub
Aluminiumprofilschrott	Al, Mg, Si 0,5 %	frei von jeglichen Fremdbestandteilen
Drahtschrott aus Reinaluminium	Unbeschichteter Drahtschrott aus unlegiertem Al; frei von Siebdraht, Eisen und anderen Fremdbestandteilen (Kunststoff, Schraube, …)	2 % Öl, Fett und Oxide

Quelle: Verband Deutscher Metallhändler e.V. (2012).

Neben diesen Usancen gibt es weitere Regelungen und Normen, in denen Spezifikationen definiert sind und laut einer europäischen Verordnung gelten grundsätzlich folgende Anforderungen an Aluminiumschrott (Europäischen Union 31.03.2011):

- Der Anteil von Fremdstoffen beträgt höchstens 5 Gew.-% bzw. die Metallausbeute liegt bei über 90 %.
- Zu Fremdstoffen gehören:
  - andere Metalle,
  - nichtmetallische Stoffe (Erde, Staub, Glas, Kunststoff, etc.),
  - sonstige chemische und organische Substanzen,
  - größere Teile (Reifen, mit Zement gefüllte Rohre, Holz, Beton, etc.),
  - sowie Reststoffe aus der Aluminiumproduktion (Schlacke, Krätze, Filterstaub, etc.).

- Der Schrott muss frei sein von Ölen, Schmierstoffen und Fetten, und
- es dürfen keine unter Druck stehenden, geschlossenen oder unzureichend geöffnete Behälter enthalten sein, welche in den Schmelzöfen zu Explosionen führen können.

Ausführlichere Informationen bzgl. der spezifischen Anforderungen bestimmter Aluminiumschrott-Sorten sind in den europäischen Normen DIN EN 13920-1 und DIN EN 12258 festgelegt (Martens und Goldmann 2016; Capuzzi und Timelli 2018), wobei Tabelle 74 einen Ausschnitt aus der DIN EN 13920-1 wiedergibt.

Tabelle 74: Auszug aus der Aluminiumschrott-Klassifizierung nach der DIN EN 13920.

EN 13920 Teil Nr.	Art des Schrotts	Metallausbeute (untere Grenze) [%]	Metallausbeute (Durchschnitt) [%]	Enthaltene Oxide [%]	Fremdmaterial [%]
2	Unlegiertes Aluminium	0,95	-	-	-
3	Drähte und Kabel	≥ 0,95	97,7	1,3	0,5
4	Einzelne Knetlegierungen	≥ 0,95	97,2	1,8	1,8
5	Zwei oder mehrere Knetlegierungen (gleiche Art)	≥ 0,88	97,2	1,0	2,0
6	Zwei oder mehr Knetlegierungen	≥ 0,88	94	0,8	5,2
7	Gusslegierungen	≥ 0,9	83,4	6,2	10,4
8	Geschreddert (nicht getrennt)	≥ 0,9	-	-	-
9	Geschreddert (getrennt)	≥ 0,9	94,5	5,4	10,1
10	Gebrauchte Getränkedosen	≥ 0,88	94	0,8	5,2

Quelle: Capuzzi und Timelli (2018).

Nach dieser Norm dürfen keine Inhaltsstoffe wie Asbest, Cadmium, Quecksilber, Lithium, Selen, polychlorierte Biphenyle, explosive und radioaktive Stoffe im Schrott enthalten sein. Falls nicht anders vereinbart, sollte der Schrott frei von Fremdstoffen sein. Des Weiteren sollten einzelne Schrottstücke nicht größer als 600 x 600 x 400 mm sein und nicht mehr als 200 kg wiegen.

Bei der Anlieferung werden Prüfungen bezüglich Feuchtigkeit, Anwesenheit von freiem Eisen sowie der Bestimmung der Metallausbeute und der chemischen Zusammensetzung durchgeführt. Falls freies Eisen im Schrott enthalten ist, sollte dieses mit entsprechenden Maßnahmen entfernt werden. Die spezifischen Anforderungen und Toleranzen der chemischen Zusammensetzungen für bestimmte Schrottsorten sind in DIN EN 13920 Teil 2-10 zu finden (DIN EN 13920-1:2003).

6.5.3 Kupfer

Kupfer ist nach Eisen und Aluminium einer der wichtigsten und meist geförderten metallischen Rohstoffe (Gilsbach 2020). Zu den wichtigsten (Primär-) Kupfer-Produktionsländern gehören Chile, China, Peru, USA, Australien und die DR Kongo (Gilsbach 2020; Röhr 2018).

In Deutschland werden mehr als 50 % des jährlichen Kupferbedarfs aus rezykliertem Material zur Verfügung gestellt (Tikana und Schmitz 2020; Deutsches Kupferinstitut). Auch der Kupferbedarf in Europa wird derzeit zu fast 50 % durch Recycling gedeckt (Schmitz 2020). Global beträgt der Anteil des rezyklierten Kupfers jedoch nur etwa ein Drittel der gesamten Weltproduktion (Deutsches Kupferinstitut; Agrawal und Sahu 2010).

Bei der Primärroute (Anhang A.4.1) gehen rund 27 % des Energiebedarfs auf die Verhüttung und weitere 7 % auf die Raffination des Kupfers zurück. Der Energiebedarf des Kupferrecyclings beträgt etwa 15 % des Energiebedarfs der Primärroute (Gilsbach 2020; Deutsches Kupferinstitut; Agrawal und Sahu 2010), in dem auch die benötigten Energien für den Abbau, Transport und Aufbereitung der Ausgangsmaterialien enthalten ist (Tikana und Schmitz 2020). Insgesamt liegt der KEA des Kupferrecyclings etwa 31 % unter dem der Primärroute und auch die gasförmigen Emissionen und die Staubbildung können um bis zu 79 % reduziert werden. Einzige Ausnahme ist die Bildung von Methan, die beim Kupferrecycling um 39 % gegenüber der Primärroute erhöht ist, kein Unterschied liegt bei der Bildung von N_2O vor (Tabelle 75). Detaillierte Informationen zum Vergleich der Daten zu Massenströmen und dem KEA beider Routen sind in Anhang A.4.2 aufgeführt.

Durch die hohe Lebensdauer vieler Kupferprodukte stehen diese erst nach langer Nutzungszeit dem Recycling zur Verfügung. Die Nachfrage an Kupferwerkstoffen steigt stetig, weshalb der gesamte Kupferbedarf bisher nur teilweise mit sekundärem Kupfer gedeckt werden kann (Gilsbach 2020). Jedoch kann Kupfer ohne Qualitätseinbußen beliebig oft rezykliert werden (Deutsches Kupferinstitut) und es besteht kein qualitativer Unterschied zwischen Primär- und Sekundärkupfer (Tikana und Schmitz 2020).

Tabelle 75: Ergebnisse zur ganzheitlichen Bilanzierung von Kupfer-Mix frei Halbzeugwerk (Deutschland) aus der Primärroute gegenüber dem Recycling.

		Primärkupfer	Recycling-Kupfer
KEA	[MJ/t]	44.214	30.716
CO_2	[kg/t]	2.749	1.413
CO	[g/t]	3.549	1.162
NO_X	[g/t]	9.656	2.845
SO_2	[g/t]	4.723	1.017
CH_4	[g/t]	5.984	8.303
NMVOC*	[g/t]	1.070	245
N_2O	[g/t]	151	152
Staub	[g/t]	710	205

*NMVOC = Non Methane Voltaile Organic Compounds;
Quelle:Corradini et al.Corradine; Huttner; Köhler (1999).

6.5.3.1 Recycling von Kupfer

Die größte Herausforderung des Kupferrecyclings besteht darin, reines Kupfer durch die Entfernung von Begleitelementen anzureichern sowie die Begleitelemente gezielt zu gewinnen (Deutsches Kupferinstitut).

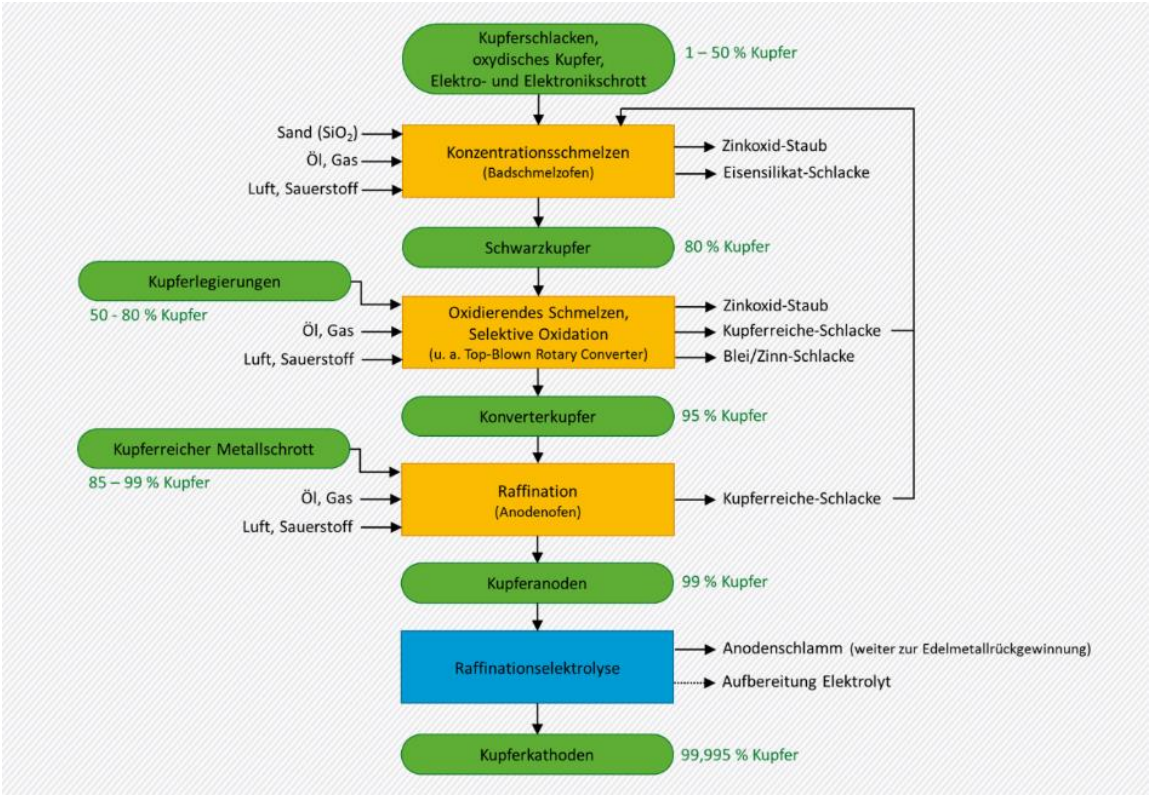
Kupferhaltige Schrotte setzen sich meist aus vielen verschiedenen Metallen, Plastik und Keramik zusammen, wodurch eine hinreichende Aufbereitung und Abtrennung der Kupferschrotte einen wesentlichen Teil zum Recyclingprozess beiträgt (Worrel und Reuter 2014). Dabei können die Schrotte in Neuschrotte bzw. Produktionsabfälle und Altschrotte eingeteilt werden. Neuschrotte beinhalten sortenreine Schrotte ohne Verunreinigungen. Altschrotte hingegen beinhalten im Allgemeinen verbrauchte Wirtschaftsgüter, welche sich in der Qualität und den Kupfer- und Legierungsgehalten deutlich unterscheiden können (Martens und Goldmann 2016; Gilsbach 2020; Deutsches Kupferinstitut; Bureau of International Recycling 2016). Nach Usancen und Klassifizierungen des Verbands Deutscher Metallhändler e.V. gibt es 33 verschiedene Sorten von Kupfer und Kupferlegierungsschrotten (Verband Deutscher Metallhändler e.V. 2012).

Die Recyclingverfahren von Kupfer können in pyro- und hydrometallurgische Verfahren eingeteilt werden. Pyrometallurgische Verfahren werden für Einsatzstoffe mit hohem Cu-Gehalt verwendet, hydrometallurgische Verfahren für die Aufbereitung von Reststoffen der Produktionsprozesse sowie Einsatzmaterial mit niedrigem Cu-Gehalt (Röhr 2018; Martens und Goldmann 2016; Agrawal und Sahu 2010).

6.5.3.1.1 Recycling von Kupfer in pyrometallurgischen Verfahren

Pyrometallurgisches Kupferrecycling besteht im Wesentlichen aus den vier Grundoperationen reduzierendes Schmelzen / Konzentrationsschmelzen, oxidierendes Schmelzen / Konvertieren, Raffination in Anodenöfen und Raffinationselektrolyse (Deutsches Kupferinstitut; Martens und Goldmann 2016). Eine Übersicht der Teilprozesse des Kupferrecyclings sowie mögliche Einsatz- und Nebenprodukte sind in Abbildung 177 dargestellt.

Abbildung 177: Teilprozesse beim Kupferrecycling.



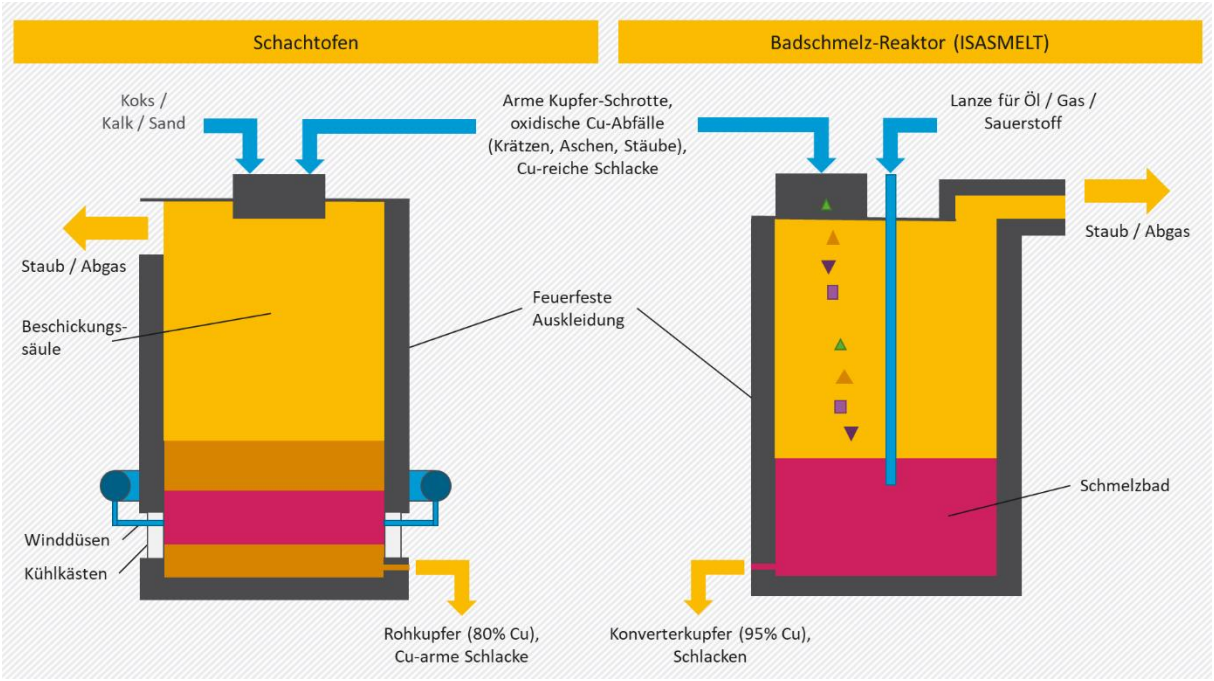
Quelle: Eigene Darstellung, KIT-ITC, vereinfacht und gekürzt nach Martens und Goldmann (2016).

Die Art der Schmelzöfen sowie die jeweilige Prozessführung hängen von den eingesetzten Schrottarten und deren Kupfergehalten ab (Worrel und Reuter 2014).

Hochwertiger und reiner Kupferschrott (Neuschrott) kann durch Umschmelzen direkt verwertet werden (Martens und Goldmann 2016; Worrel und Reuter 2014). Altschrott bzw. verunreinigter Schrott muss in aufwändigeren Verfahren aufbereitet werden (Worrel und Reuter 2014). Dafür werden die Altschrotte zunächst in einer Konzentrationsschmelze geschmolzen, wodurch die wichtigsten Wertmetalle in der Metallschmelze gesammelt werden. Durch Zugabe von silikatischen und oxydischen Zuschlägen wird eine Schlackenbildung gefördert, in der Begleitelemente abgetrennt werden können. Flüchtige Stoffe, wie beispielsweise Zinkoxid (ZnO), werden über die Gewinnung eines Flugstaubes abgetrennt. Des Weiteren werden die heißen Abgase (CO_2, C_mH_n, SO_2, HCl, u. a.) der Verbrennungsprodukte von Kunststoffen, Lacken und Salzen abgeführt (Martens und Goldmann 2016) und teis zur prozessinternen Energiegewinnung genutzt. Anschließend folgt die Reinigung in einer Filteranlage (Giegrich et al. 2007).

Das klassische Konzentrationsschmelzen erfolgt in sog. Schachtöfen (Abbildung 178) unter Zugabe von Koks als Brennstoff und geeigneten Reduktionsmitteln. Dabei entstehen kupferarme Schlacken (Cu-Gehalt 1 bis 2%), Rohkupfer (Schwarzkupfer) und Flugstäube. Durch die reduzierende Arbeitsweise des Schachtofens können auch kupferreiche Schlacken wie Konverterschlacken oder Raffinationsschlacken zur Kupferrückgewinnung aufbereitet werden (Martens und Goldmann 2016). Übliche Temperaturen für den Schmelzvorgang sind 1.150 bis 1.350 °C (Steinacker et al. 2015).

Abbildung 178: Schmelzöfen für das Konzentrationsschmelzen beim Kupferrecycling.



Quelle: Eigene Darstellung, KIT-ITC, nach Martens und Goldmann (2016).

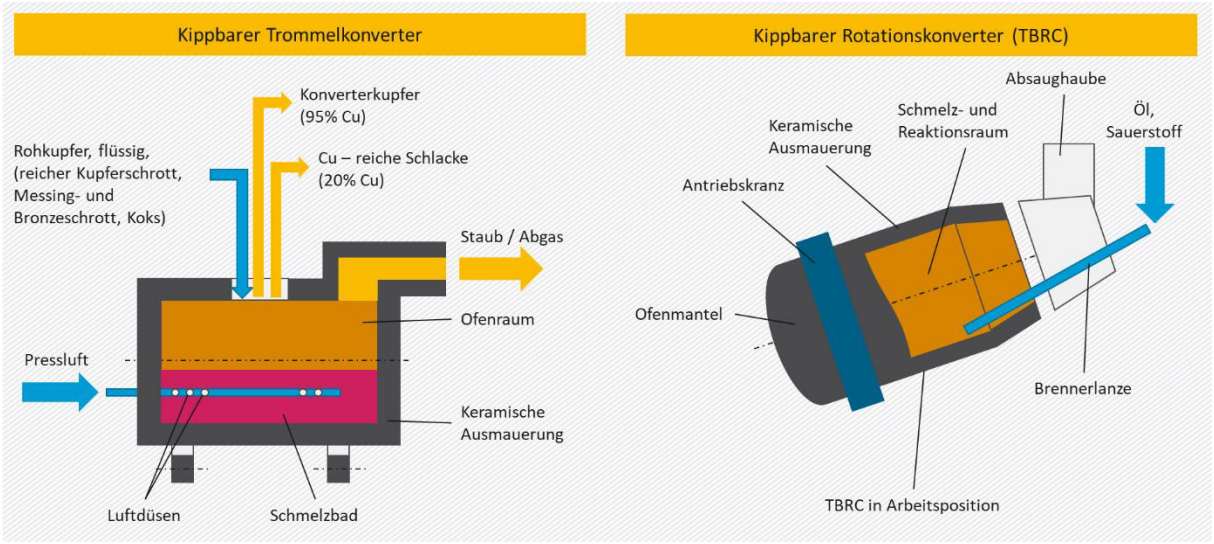
In den letzten zwei Jahrzenten wurden vermehrt Badschmelzöfen (ISASMELT-Reaktoren) für das Konzentrationsschmelzen eingesetzt, da diese auf den Einsatz von Koks verzichten und stattdessen mittels einer Brennerlanze, die in die Schmelze eintaucht, Sauerstoff in die Schmelze einblasen (Martens und Goldmann 2016). Als Nebenprodukte fallen eine Eisen-Silikat-Schlacke sowie ZnO-Stäube an (Martens und Goldmann 2016; Deutsches Kupferinstitut).

Das aus den Konzentrationsschmelzen erhaltene, flüssige Rohkupfer (Cu-Gehalt etwa 80 %) wird in einem nachfolgenden Konverter weiter gereinigt (Abbildung 179). Neben flüssigem Rohkupfer kann Kupferschrott mit hohem Kupfer-Gehalt direkt zugegeben werden. Die Produkte des Konverters sind das Konverterkupfer (Cu-Gehalt ca. 95 %) sowie die Konverterschlacke, welche in Schmelzöfen für das Konzentrationsschmelzen rückgeführt werden.

Hierbei ermöglicht die geringe Sauerstoffaffinität des Kupfers die Entfernung einer Vielzahl von Begleitelementen durch selektive Oxidation. Legierungselemente wie Blei und Zinn können in Form von Zinn(II)-Oxid (SnO) und Blei(II)-Oxid (PbO) in Schlacken abgeführt werden. Zink verdampft aufgrund seines hohen Dampfdrucks sehr schnell, wodurch ein ZnO-Flugstaub entsteht. Dieser wird abgeführt und separat aufbereitet durch Verdampfung in Form von Zinkdampf. Weiterhin können Eisen, Aluminium, Mangan, und Silizium entfernt werden.

Edlere Metalle wie Silber, Gold, Platin etc. können über dieses Verfahren nicht entfernt werden, daher wird dazu eine elektrolytische Raffination genutzt. Dabei sammeln sich die genannten Edelmetalle, Selen und Tellur in einem Anodenschlamm an, welcher im Anschluss aufbereitet wird (Martens und Goldmann 2016; Tikana und Schmitz 2020).

Abbildung 179: Schematische Darstellung eines kippbaren Trommelkonverters (links) und eines kippbaren Rotationskonverters (Top-Blown Rotary Converter, TBRC) zur Verarbeitung von flüssigem Rohkupfer und reichen Kupferschrotten.



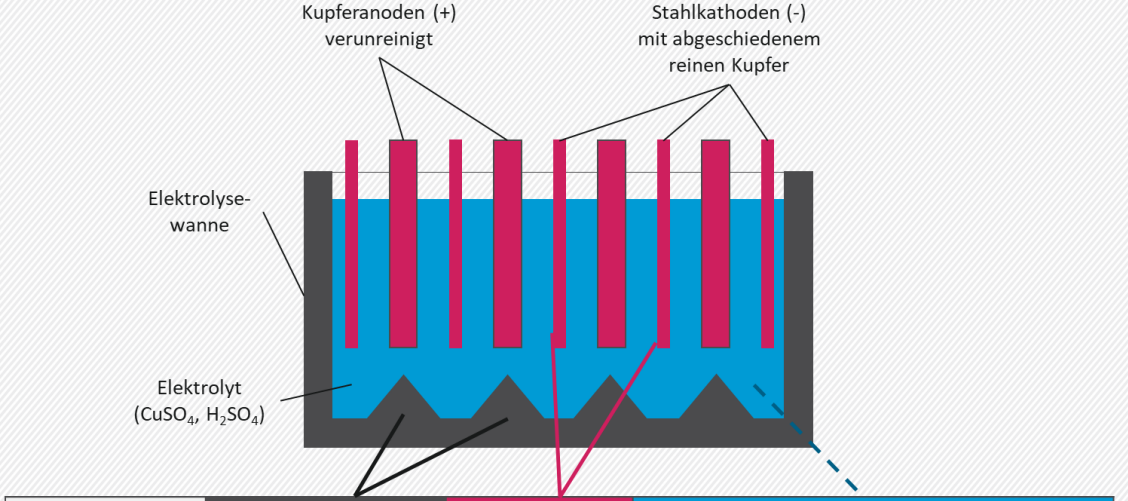
Quelle: Eigene Darstellung, KIT-ITC, nach Martens und Goldmann (2016).

Konverterkupfer wird in sog. Anodenöfen unter Zugabe von reinen, kupferreichen Metallschrotten geschmolzen und dabei werden Verunreinigungen erneut durch Einblasen von Luft und Sauerstoff selektiv oxidiert und eine kupferreiche Schlacke (Cu-Gehalt bis zu 35%) abgeführt (Deutsches Kupferinstitut; Martens und Goldmann 2016). Diese Schlacke wird zum Konzentrationsschmelzen rückgeführt und das geschmolzene Kupfer zu Kupferanoden gegossen (Martens und Goldmann 2016).

Im letzten Schritt des Recyclingprozesses erfolgt die elektrolytische Raffination der Kupferanoden in einer Schwefelsäure-Kupfersulfat-Lösung (Abbildung 180). Dies dient zur Entfernung der verbleibenden Edelmetalle sowie der Erhöhung des Kupfergehalts auf 99 bis 99,98 %. Durch die elektrolytische Raffination hat das Produkt die gleiche Qualität wie Primärkupfer (Deutsches Kupferinstitut; Martens und Goldmann 2016).

Kupfer und andere Metalle aus den Kupferanoden lösen sich in dem Elektrolyten, während Edelmetalle elektrochemisch unlöslich sind und sich in einem Anodenschlamm sammeln. Zusätzlich können sich schwerlösliche Verbindungen bilden, welche ebenfalls in dem Anodenschlamm zu finden sind. Dieser wird anschließend aufbereitet, um die enthaltenen Edelmetalle zurückzugewinnen. Das im Elektrolyten gelöste Kupfer wird an Stahlkathoden als reines Kupfer abgeschieden und fällt in Form von dünnen Kupfer-Blechen aus, welche für die weitere Verwendung umgeschmolzen werden (Martens und Goldmann 2016).

Abbildung 180: Schematische Darstellung des elektrolytischen Raffinationsverfahrens zur Aufbereitung von Konverterkupfer.



	Anodenschlamm			Kathoden-Kupfer	Elektrolyt ($CuSO_4$, H_2SO_4)					
Normal-Potential (V)	Pt +1,6	Au +1,4	Ag +0,81	Cu +0,35	H 0	Pb -0,13	Sn -0,14	Ni -0,25	Fe -0,44	Zn -0,76
Elektro-chemischer Effekt	Elektrochemisch unlöslich.			Abscheidung an der Kathode, hochrein, kompakt.	Elektrochemisch löslich. Keine Abscheidung vor dem Kupfer und dadurch Anreicherung dieser Metalle im Elektrolyt.					

Quelle: Eigene Darstellung, KIT-ITC, nach Martens und Goldmann (2016).

6.5.3.1.2 Recycling von Kupfer in hydrometallurgischen Verfahren

Hydrometallurgische Verfahren dienen zur Gewinnung von geringen Kupfermengen aus großen Massen an Fremdmaterial. Dies erfolgt durch selektive Laugung von Kupfer, wobei ein unlöslicher Rückstand abgetrennt wird. Das gelöste Kupfer wird als Elektrolytkupfer oder als handelsfähiges reines Kupfersalz abgeschieden. Dazu stehen drei verschiedene Möglichkeiten zur Verfügung (Martens und Goldmann 2016).

Bei der **Laugung mit ammoniakalischer Ammoniumkarbonatlösung und Luft** löst sich Kupfer in Form eines Amminkomplexes:

$$Cu + \frac{1}{2}O_2 + 2NH_3 + (NH_4)_2CO_3 \rightarrow [Cu(NH_3)_4]CO + H_2O$$

Neben Kupfer ist es auch möglich, Nickel (Ni) in dem Komplex zu lösen. Die meisten anderen Metalle, Kunststoffe und keramische Verbindungen sind hingegen unlöslich. Der verwendete Ammoniak (NH_3) ist regenerierbar.

Bei der Laugung mit Eisen(III)-Sulfatlösung löst sich Kupfer als Kupfer-Sulfat ($CuSO_4$):

$$Cu + Fe_2(SO_4)_3 \rightarrow CuSO_4 + 2\,FeSO_4$$

Metalle wie Zink und Zinn können ebenfalls gelöst werden. Metallisches Eisen darf in dem Kupferschrott nicht enthalten sein, da es Fe^{3+} zu Fe^{2+} reduzieren würde, und damit den Löseprozess zunichtemacht. Edlere Metalle sind unlöslich und können aus dem Rückstand

zurückgewonnen werden. Kunststoffe und keramische Verbindungen sind unlöslich. Die Eisen(III)-Sulfat-Lösung ist regenerierbar.

Die dritte Möglichkeit ist die **Laugung mit Schwefelsäure und Luft,** bei der Kupfer zu Kupfersulfat und Wasser reagiert:

$$Cu + H_2SO_4 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow CuSO_4 + H_2O$$

Ein Nachteil dieser Methode ist, dass bis auf die Edelmetalle alle Metalle auch in Lösung gehen, wobei Kunststoffe und Keramiken hingegen unlöslich sind.

Nach der selektiven Laugung des Kupferschrotts wird das gelöste Kupfer zurückgewonnen und die effektivste Methode ist hierzu die Reduktionselektrolyse der $CuSO_4$-Lösungen mit unlöslichen Anoden wie beispielsweise Titananoden und Stahlblechkathoden:

$$CuSO_4 + H_2O \rightarrow Cu + H_2SO_4 + \frac{1}{2}O_2$$

Bei dieser Reduktionselektrolyse bilden sich Schwefelsäure und Sauerstoff und es findet eine Entkupferung statt. Das gebildete Kupfer setzt sich an den Stahlblechkathoden ab und kann entfernt werden.

Eine weitere Möglichkeit der Kupferrückgewinnung ist die sog. Zementation, bei der Kupfer-Ionen durch das unedlere Metall Eisen reduziert werden und als Metallpulver (Zementkupfer) ausfallen:

$$Cu^{2+} + Fe \rightarrow Cu + Fe^{2+}$$

Das erhaltene Zementkupfer besteht aus 60 bis 90 % Kuper und 10 bis 30 % Eisen, wodurch es schmelztechnisch aufbereitet werden kann.

Im Falle einer Kupfer-Tetraaminkomplex-Lösung, die bei der Laugung mit ammoniakalischer Ammoniumkarbonatlösung und Luft entsteht, kann das Kupfer durch Erhitzen der Lösung abgetrennt werden. Dabei entsteht NH_3, welches abdestilliert wird, während das Kupfer als Mischung von Kupfer(II)-Hydroxid ($Cu(OH)_2$) und Kupfer(II)-Oxid (CuO) ausfällt. Diese Mischung kann als Oxidationszuschlag in Kupfer-Raffinieröfen zugegeben werden.

Um das Kupfer nach den beschriebenen Laugungsverfahren elektrolytisch abzuscheiden sind hohe Cu-Konzentrationen und ein gewisser Reinheitsgrad der Lösungen erforderlich. Dies kann über Ionenaustausch- oder Flüssig-Flüssig-Extraktionsverfahren erreicht werden. Für den Ionenaustausch werden oft Kunstharz-Kationenaustauscher verwendet, und anschließend erfolgt eine Elution mit Schwefelsäure (H_2SO_4). Eine weitere Möglichkeit ist die Solventextraktion bzw. Flüssig-Flüssig-Extraktion. Dabei kann beispielsweise Kupfer aus ammoniakalischen Lösungen extrahiert und aufkonzentriert werden. Beide Verfahren liefern hochkonzentrierte Kupfer-Sulfat-Lösungen ($CuSO_4$), die sehr gut mittels Reduktionselektrolyse zu verarbeiten sind (Martens und Goldmann 2016).

Informationen zum Umgang mit den prozessspezifischen Reststoffen des Kupferrecyclings sind in Anhang A.4.3 dargestellt. Dabei handelt es sich meist um etablierte Prozesse, in denen die Reststoffe sicher und schadlos weiterverarbeitet werden. Eine weiterführende Betrachtung findet daher an dieser Stelle nicht statt.

6.5.3.2 Einfluss von Verunreinigungen auf die Rezyklatqualität

Während des Lebenszyklus der Kupferprodukte sowie beim Recycling von Kupferschrotten aus verschiedenen Quellen können sich eine Vielzahl an Fremdelementen im Kupfer bzw. der Kupferschmelze ansammeln.

Vorteile des Kupfers gegenüber anderen Metallen sind die geringe Sauerstoffaffinität sowie hervorragende elektrochemische Eigenschaften, wodurch es möglich ist, nahezu alle Begleitelemente aus dem Kupfer zu entfernen. Verunreinigungen wie Wolfram, Bor, Aluminium, Chrom, Gallium, Eisen, Germanium, Mangan, Indium, Magnesium, und Strontium können über selektive Oxidation in eine Schlacke überführt und aus der Kupferschmelze entfernt werden. Elemente wie Nickel, Rhenium und Cadmium gehen teilweise in die Schlackenphase über.

Edlere Metalle wie Silber, Gold, Platin, Palladium und Rhodium lassen sich nicht durch Schlackenbildung aus der Kupferschmelze entfernen. Durch das positive Normalpotential des Kupfers (+0,345 V für Cu/Cu^{2+}) ist es jedoch möglich, diese Elemente mittels elektrolytischer Raffination zu entfernen (Nakajima et al. 2011; Martens und Goldmann 2016).

Das vollständig rezyklierte Kupfer besitzt einen Cu-Gehalt von 99 bis 99,98 % (Martens und Goldmann 2016; Metalle Schmidt GmbH) und die Zusammensetzung des Rests ist abhängig von dem jeweiligen Werkstoff bzw. der Legierungsart (Metalle Schmidt GmbH).

Ein weiterer wichtiger Faktor sind die Gehalte von Wasserstoff (H_2) und Sauerstoff (O_2) innerhalb des Kupfers. Wasserstoff erhöht die Porosität der Kupferwerkstoffe, wodurch die Lebensdauer deutlich verkürzt wird. Sauerstoff wiederum erhöht die Versprödung der Kupferwerkstoffe und mindert damit die Leitfähigkeit. Aufgrund dessen gelten strenge Spezifikationen für Sauerstoff- und Wasserstoffanteile. Weiterhin kann die Aufnahme von Sauerstoff und Wasserstoff in der Schmelze durch geeignetes Feuerfestmaterial, niedrige Schmelztemperaturen und Abdeckmittel[17] minimiert werden. Die Verringerung des Sauerstoffgehalts in der Schmelze kann zusätzlich durch Zugabe von Desoxidationsmitteln erfolgen (Steinacker et al. 2015).

6.5.3.3 Anforderungen an das Einsatzmaterial

Um einen optimalen Recyclingprozess zu gewährleisten, müssen die eingesetzten Schrotte bestimmte Anforderungen bzgl. ihrer Geometrie und möglicher Zusätzen erfüllen. Die Abmessungen der Schrotte sind wichtig für eine gute Ofenbeschickung und dabei gilt für Kupfer eine identische Klassierung wie für Aluminium.

Der Gesamtanteil von Verunreinigungen des Kupferschrotts darf einen maximalen Wert von 2 Gew.-% nicht überschreiten. Zu diesen Verunreinigungen zählen alle Metalle außer Kupfer und Kupferlegierungen, nichtmetallische Stoffe, Erde, Staub, Isoliermaterial, Glas, brennbare nichtmetallische Stoffe (Gummi, Kunststoff, Gewebe, Holz, andere chemische und organische Materialien), Schlacke, Krätze, Filterstaub, Schleifstaub und Schlämme.

Des Weiteren sollte der Schrott frei sein von übermäßigen Anteilen an Metalloxiden, sichtbarem Öl, Ölemulsionen, Schmiermitteln, Fett, PVC, Anstrichen, Restkunststoffen sowie von unter Druck stehenden, geschlossenen oder unzureichend geöffneten Behältern, die in Öfen zu Explosionen führen können (Europäischen Union 25.07.2013, S. 17–18; Verband Deutscher Metallhändler e.V. 2012).

[17]Abdeckmittel dienen als Barriere zwischen der Oberfläche der Schmelze und der Atmosphäre, sodass die H_2- und O_2-Aufnahme reduziert wird. Beispiele hierfür sind Glas, Quarzsand, Kupferoxid oder Silikat-Borat-Mischungen.

Ein Auszug verschiedener Kupferschrott-Klassifizierungen ist in Tabelle 76 dargestellt. Weitere Schrottarten und deren Anforderungen, insbesondere der Kupferlegierungen, sind in den Usancen der Deutschen Metallhändler gelistet (Verband Deutscher Metallhändler e.V. 2012).

Tabelle 76: Auszug der Klassifizierung von Kupferschrott.

Bezeichnung	Anforderungen an Geometrie	Kommentare
Blanker Kupferdrahtschrott	Mind. 1 mm Durchmesser	Sauberer, nicht abgebrannter, blanker, nichtlegierter Kupferdrahtschrott
Nicht legierter Kupferdrahtschrott I	Mind. 1 mm Durchmesser	Nicht legierter Kupferdrahtschrott, frei von anderem brüchigem Draht
Nicht legierter Kupferdrahtschrott II	Mind. 0,15 mm Durchmesser	Nicht legierter Kupferdrahtschrott, mind. 94 % Cu-Gehalt, frei von verbranntem Draht
Gemischter Kupferschrott	Mind. Stärke 0,15 mm	Nicht legierter Kupferschrott, mind. 96 % Cu-Gehalt, max. 15 % verzinntes, mischverzinntes, mit Lot behaftetes Material
Leichtkupferschrott	Ofenrecht	Rohr- und Blechstücke aus Kupfer, gemischter Kupferdraht einschließlich Haardraht, Kupferspäne, Kupfergeräte aller Art, mind. 88 % Cu-Gehalt
Schwerkupferschrott	Mind. Stärke 1 mm, Tiegelrecht	
Sonstiger Kupferschrott		Kupfer-Raffiniermaterial: Ist je nach Art und Kupfergehalt zu definieren, mind. 80 % Cu-Gehalt
Kupferrückstände		Kauf erfolgt nach Analyse, Muster oder Vereinbarung

Quelle: Verband Deutscher Metallhändler e.V. (2012).

6.6 Verwertung von Balsaholz

Das Holz des tropischen Balsabaums zeichnet sich durch seine leichte Verarbeitbarkeit bei einer im Vergleich zu anderen Hölzern geringen Dichte aus, wobei es sich um ein Plantagenholz aus den Tropen handelt. Wegen der geringen Dichte wird Balsaholz als Strukturmaterial in Rotorblättern eingesetzt, wobei dessen Anteil bezogen auf die Gesamtmasse eines Rotorblatts bei etwa 5 Gew.-% liegt (Albers et al. 2021a). Balsaholz ist das leichteste bekannte Holz und ist aufgrund seiner hohen Druckfestigkeit und strukturellen Festigkeit für technische Anwendungen von großer Bedeutung. So wird es unter anderem in großen Mengen bei der Herstellung von Rotorblättern von WEA genutzt. Als Alternative zu Balsaholz werden auch hochfeste Schäume verwendet.

Bislang wird der Füllstoff (Balsaholz/Schaum) beim Recycling von Rotorblättern nicht vom faserverstärkten Kunststoff getrennt, wobei der gesamte Materialmix allgemein zerkleinert und im Zementwerk verwertet wird, wo die Asche des GFK stofflich und die restlichen Materialien, wie die Matrix des GFK, das Balsaholz und die Schäume energetisch verwertet werden (Meinlschmidt 2017).

Wird ein Recycling von Balsaholz angestrebt, so geht dies üblicherweise über die Herstellung von Holzspänen oder Holzfasern , die in weiteren Schritten zu Holzfaserdämmstoffen oder Holzschaum verarbeitet werden können. Umfangreiche Untersuchungen zur Verwertung von Balsaholz aus Rotorblättern wurden im Verbundprojekt ReRoBalsa unter Federführung des Fraunhofer-Institut für Holzforschung (WKI) (Fraunhofer-Institut für Holzforschung, Wilhelm-Klauditz-Institut (WKI) 2020) durchgeführt. Ziel des Projekts war die Herstellung eines Dämmstoffes und Holzschaums auf Basis von recyceltem Balsaholz bei einer Reduzierung des CO_2-Ausstoßes im Vergleich zur bisherigen thermischen Verwertung von Rotorblattabfällen, wozu eine Abtrennung des Balsaholzes von den anderen Materialien notwendig wird.

Das Projekt ReRoBalsa war in vier Arbeitspakte (AP) untergliedert:

- Demontagetechnik und Vorzerkleinerung
- Untersuchung von Trenn- und Zerkleinerungsverfahren
- Herstellung von Dämmstoffen und Holzschäumen
- Verfahrensbeurteilung anhand einer Ökobilanzierung

Im ersten Arbeitspaket (AP1) wurden Konzepte zur Demontage und Vorzerkleinerung von Rotorblättern festgelegt und die Demontage der Rotorblätter mittels Wasserstrahlschneiden untersucht, wobei ein Rotorblatt vor Ort in drei 12 m-Stücke geteilt und per LKW verladen wurde, zwecks weiterer Zerkleinerung bei einem Verwerter.

Die Wasserstrahlschneidtechnik wird generell als vorteilhaft beschrieben und bietet die Möglichkeit einer Zerkleinerung sowohl vor Ort, als auch bei einem lokalen Verwerter. Zur Optimierung des Trennverfahrens wurde im Rahmen des Projekts eine Schneidevorrichtung mit elektrischem Antrieb entwickelt, da mit dem zunächst eingesetzten hydraulischen Antrieb kein gleichmäßiges Schneiden erzielbar war. Das Schneidewasser kann vor Ort aufbereitet werden, wofür verschiedene Vliese zur Wasserfiltration getestet wurden. Der Filterrückstandsowie das Filtrat wurden nach einer Trocknung mit Hilfe der Rasterelektronenmikroskopie untersucht. Das beste Ergebnis für die Wasseraufbereitung wurde mit dem Filtervlies Typen PPV 2727 hierbei erzielt.

Für die Herstellung von Dämmmaterialien sind Ausgangsmaterialien mit einem niedrigen Feuchtigkeitsgehalt notwendig, wobei nach dem Wasserstrahlschneiden jedoch Wassergehalte von etwa 20 % im Bereich der Schnittstelle vorliegen können, die zu hoch sind.

Untersuchungen zur Zerkleinerung von Balsaholz erfolgten mit einer Schneid- und einer Hammermühle. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in Tabelle 77 dargestellt. Diese Zerkleinerungsversuche wurden mit reinem Balsaholz durchgeführt, da ganze Rotorblattbauteile mit GFK-Anteilen sich sehr abrasiv verhalten, was zu einem starken Verschleiß der Schneidblätter führt.

Tabelle 77: Zerkleinerung von Balsaholz mit einer Hammer- und Schneidemühle.

Schneidemühle	Hammermühle
Partikelgröße 0,25-20 mm	Partikelgröße durch Einlegesieb bestimmt: Versuche mit 10 mm und 4 mm Sieb
mehr Energie, je kleiner die Partikelgröße	mehr Energie, je kleiner die Partikelgröße
große Partikelgrößenverteilung	sehr große Partikelgrößenverteilung
gute Reproduzierbarkeit	gute Reproduzierbarkeit
große Schwankungen in der Zerkleinerungsenergie	große Schwankungen in der Zerkleinerungsenergie

Quelle: Meinlschmidt (2017).

Zerkleinerungsversuche von Rotorblattteilen erfolgten mittels einer Hammermühle und einem sogenannten *EcoPulser*, einem Verfahren der Firma Krause Maschinenbau zur Trennung verklebter Materialien, wobei in beiden Fällen eine Vorzerkleinerung der Materialien notwendig war (Tabelle 78).

Tabelle 78: Zerkleinerung von Rotorblattteilen mit einer Hammermühle und EcoPulser-Verfahren.

Hammermühle	EcoPulser
Zunahme der Zerkleinerungsenergie mit Abnahme der Maschenweite des Einlegesiebs	Erste Versuche führten zur erfolgreichen Abtrennung des Balsaholzes.
Gute reproduzierbare Ergebnisse, geringe Schwankungen in der spezifischen Zerkleinerungsenergie	Materialien müssen schon stark vorzerkleinert vorliegen. Schon bei 5 x 5 cm gab es Probleme mit der automatischen Einführung des Materials, weshalb eine Optimierung angestrebt wird.
Nach der Zerkleinerung war Balsaholz fast vollständig von GFK getrennt	
GFK Reste liegen nach der Zerkleinerung größtenteils als Verbundmaterial vor	
Schneller Verschleiß der Hämmer: Optimierung muss angestrebt werden	
Energetisch gleichwertig, jedoch energetisch höher als die reine Zerkleinerung von Balsaholz	Energetisch gleichwertig, jedoch energetisch höher als die reine Zerkleinerung von Balsaholz

Quelle: Meinlschmidt (2017).

Nach der Zerkleinerung wurde das Zerkleinerungsgut mittels eines Zick-Zack-Sichters getrennt, wobei eine vollständige Trennung von Balsaholz und GFK nicht erzielt werden konnte. Alternativ zeigte eine Trennung über den Dichteunterschied mittels Trenntisch ein gutes Ergebnis.

Im dritten Arbeitspaket (AP3) erfolgte eine Herstellung von Dämmstoffen und Holzschäumen. Hierzu wurden das zerkleinerte Balsaholz mittels einer Refinerscheibe fraktioniert und Dämmstoffe mit einem Standardklebstoff hergestellt. Zur Herstellung von Dämmstoffplatten wurden Faserkugeln geformt und je nach Fasergröße Platten unterschiedlicher Dichte hergestellt. Die Anwesenheit kleinster Mengen an GFK zeigte einen deutlichen Einfluss auf die Materialeigenschaften, wie zum Beispiel auf die Wärmeleitfähigkeit.

Allgemein erfolgt die Verwertung von Balsaholz über eine Zerkleinerung zu einem faserförmigen Zwischenprodukt (englisch mechanical pulp), das weiterverarbeitet werden kann. Als „mechanical pulp“ werden Faserstoffe als Zwischenprodukt einer mechanischen Zerfaserung von Holz bezeichnet, die für die Herstellung von Papier, Karton und Pappe eingesetzt werden. Die Herstellung erfolgt entweder durch einen rein mechanischen Holzaufschluss oder mit thermischer und/oder chemischer Vorbehandlung. Eine wirtschaftlich bedeutende Holzstoffsorte sind thermomechanische Holzstoffe, auch als TMP (**t**hermo**m**echanical **p**ulp) bezeichnet (Wikipedia 2021a).

Zur Herstellung von Schäumen wurde im Projekt ReRoBalsa Balsaholz zu TMP-Fasern zerkleinert und zu einer wässrigen Suspension verarbeitet, die durch Zusatz von Proteinen und H_2O_2 als Mischung geschäumt werden konnten. Durch Zugabe von Additiven in unterschiedlichen Mengen konnten die Materialeigenschaften variiert werden. Weiterhin wurden Extrusionsversuche mit Balsaholzfasern zur Herstellung von Terrassendielen durchgeführt.

Im vierten Arbeitspaket des Projekts ReRoBalsa erfolgte eine ganzheitliche Bilanzierung mit Life Cycle Assessment. Dabei wurden Energiedaten für die jeweiligen Prozesse bzw. Transportschritte, einschließlich Emissionswerte in Luft, Wasser und Boden, berücksichtigt. Durch Einsatz von Balsaholz aus Rotorblättern für die Herstellung von Dämmstoffen kann eine Reduzierung der Treibhausemission um 32 % im Vergleich zur üblichen energetischen Verwertung erzielt werden. Entsprechend den Ergebnissen des Projekts ReRoBalsa sind solche Recyclingverfahren einer energetischen Verwertung vorzuziehen.

6.7 Verwertung von in Rotorblättern verbauten Schäumen

Als Kernwerkstoffe in Rotorblättern kommen neben dem Hauptbestandteil Balsaholz auch zu einem geringeren Anteil Schäume, insbesondere Polyvinylchlorid (PVC) (teilvernetzt), aber auch Polymethacrylimid (PMI), Polyethylenterephthalat (PET), Polystyrol (PS), Styrol-Acrylnitril-Copolymer (SAN) und Polyurethane (PUR) (siehe Kapitel 2.2.3.1) zum Einsatz. Der Anteil an Kernwerkstoffen in einem Rotorblatt liegt bei etwa 5 Gew.-%, was Balsaholz mit beinhaltet. Somit liegt der Anteil an Schäumen bei etwa 2 Gew.-% (Anhang A.4)(Prissok und Hebette 2012; Albers et al. 2021a).

Aus der Entwicklungsgeschichte der Rotorblattherstellung wurden zunächst insbesondere PVC-Schäume eingesetzt, wobei als neuere Schaumkunststoffe SAN und PUR zu nennen sind, die künftig wohl verstärkt zum Einsatz kommen werden.

Wie in Kapitel 5 zur Aufbereitung dargelegt, ist eine sortenreine Abtrennung der verbauten Schäume nicht einfach realisierbar, sodass die in Rotorblätter verbauten Schäume, meist nach

der gemeinsamen Aufbereitung mit GFK und Balsaholz als Materialmix im Zementwerk verwertet werden.

Sollten Schäume als sortenreine Fraktion vorliegen, so könnten diese mittels physikalischen, thermochemischen oder chemischen Prozessen verwertet werden, wobei Löseverfahren, Pyrolyse und Solvolyse in Betracht kommen.

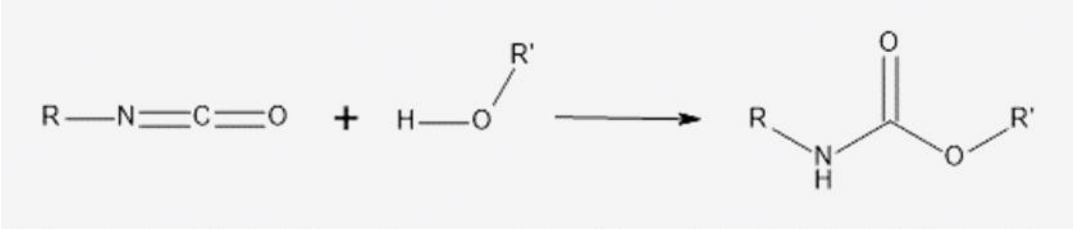
Allgemein kann die Verwertung von Schäumen mittels mechanischer Zerkleinerung erfolgen, wobei bisher der überwiegende Anteil energetisch verwertet wird. Das Recycling von Schäumen befindet sich teils in der Entwicklung und nachfolgend wird der Stand zum Recycling von Schäumen exemplarisch am Beispiel von PUR beschrieben.

6.7.1 Überblick und Recyclingverfahren für Polyurethan–Schäume

Seit ihrer Entdeckung durch Otto Bayer im Jahr 1937 haben sich Polyurethane in vielfältiger Form in nahezu allen Bereichen des täglichen Lebens durchgesetzt. Sie werden unter anderem in Form von Hart- und Weichschäumen, Elastomeren, Fasern sowie als Harze, Lacke und Klebstoffe eingesetzt (Brereton et al. 2010). In Europa wurden im Jahr 2019 rund 4 Mio. t Polyurethankunststoffe nachgefragt, was ca. 8 % der gesamten Kunststoffnachfrage entspricht (PlasticsEurope 2020).

PUR werden durch Polyaddition von Isocyanaten und mehrwertigen, langkettigen Alkoholen (ca. 200 - 6000 g/mol), den Polyolen, hergestellt. Durch Polymerisierung der Edukte bilden sich die charakteristischen Urethane aus (Abbildung 181).

Abbildung 181: Reaktionsgleichung.



Quelle: Eigene Darstellung, KIT-ITC, nach Brereton et al. (2010)

Neben den namensgebenden Urethansegmenten kommen in Polyurethankunststoffen Urea-, Isocyanurat-, und Carbodiimidgruppen als Struktureinheiten vor. Aufgrund der vielfältigen Kombinationsmöglichkeiten von Isocyanaten und Polyolen sowie dem Einsatz von Quervernetzern und anderen Additiven lassen sich die Eigenschaften des gewünschten Polymers präzise einstellen(Brereton et al. 2010); (Kemona und Piotrowska 2020). Häufig eingesetzte Polyisocyanate sind Methylendi(phenylisocyanat) (MDI), Toluoldiisocyanat (TDI), Hexamethylendiisocyanat (HDI) und Isophorondiisocyanat (IPDI). Neben Polyester- und Polyetherpolyolen können auch pflanzliche mehrwertige Alkohole wie z. B. Ricinusöl zum Einsatz kommen (Kemona und Piotrowska 2020).

Für den Umgang mit Polyurethankunststoffabfällen gilt generell die Abfallhierarchie. Ist eine Vermeidung der Abfälle nicht möglich, ist das Recycling vor der energetischen Verwertung und der Deponierung die zu bevorzugende Verwertungsmethode. Aufgrund der Fülle der Polyurethane bieten sich zahlreiche Ansätze an, wobei grundsätzlich zwischen einem mechanischen und einem chemischen Recycling unterschieden werden kann (Kemona und Piotrowska 2020).

Beim mechanischen Recycling findet keine Änderung der chemischen Struktur statt. Die Polyurethanabfälle werden mechanisch behandelt und so für eine Verwertung konditioniert. Zu nennen sind hier die Vermahlung und Einsatz als Füllmaterial in Neuware, das Rebonding oder das Formpressen. Einige Polyurethane mit thermoplastischen Eigenschaften können zudem wieder eingeschmolzen und so in für Thermoplaste gängige Spritzguss- oder Extrusionsverfahren eingebracht werden. Das Gros der Polyurethane ist jedoch den duroplastischen Kunststoffen zuzuordnen, sodass das Ein- bzw. Umschmelzen keine Option darstellt (Brereton et al. 2010).

Das chemische Recycling zielt darauf ab, aus Kunststoffabfällen Einsatzstoffe für die chemische Industrie zurückzugewinnen. Die Polymerketten der zu recyclenden Kunststoffe werden dabei zu kleineren Molekülen gebrochen. Polyurethane bieten grundsätzlich die Möglichkeit zur Depolymerisation und so zur Rückgewinnung der Kunststoffrohbausteine (Kemona und Piotrowska 2020).

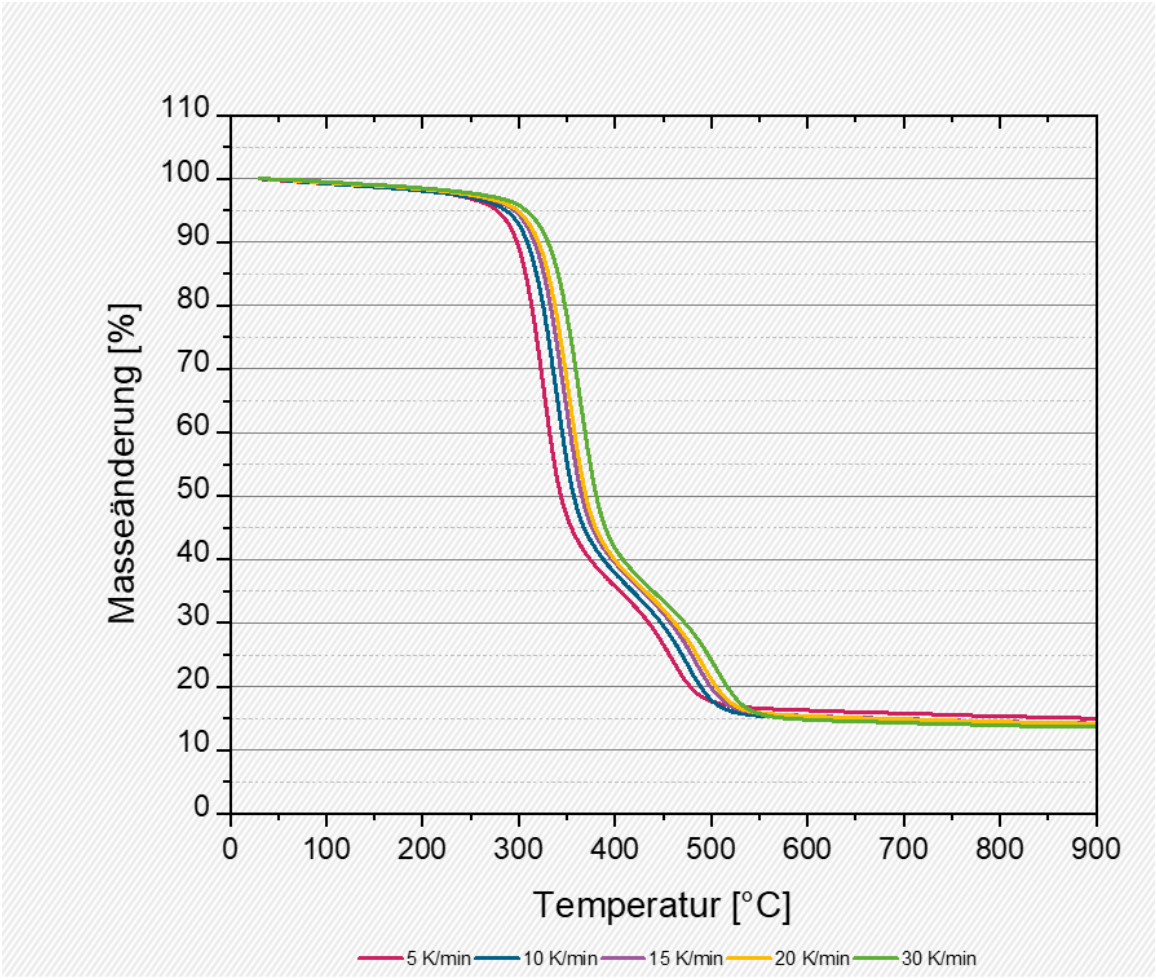
Relevante chemische Recyclingverfahren sind die Solvolyse, die Pyrolyse und die Vergasung.

Solvolytische Verfahren können anhand des verwendeten Lösungsmittels unterteilt werden in u. a. Hydrolyse, Glykolyse oder Aminolyse. Die Produkte der Solvolyse sind recycelte Polyole, welche zur Herstellung von PUR-Neuware verwendet werden können (Brereton et al. 2010). Solvolyseverfahren sind typischerweise einsatzstoffselektiv (Stapf et al.), wozu weitere Entwicklungsarbeiten notwendig sind, um die Toleranz der Solvolyse gegenüber Verunreinigungen in Post-Consumer-Abfällen zu verbessern. Aus ökonomischer Sicht sind allgemein die prozessbedingt hohen Kosten der Solvolyseverfahren nachteilig (Zia et al. 2007).

Bei der Vergasung werden die Einsatzstoffe mithilfe eines Vergasungsmediums und hoher Temperaturen umgesetzt. Dieses Verfahren eignet sich besonders für gemischte Kunststoffabfälle und liefert in Form von Synthesegas ein vergleichsweise unspezifisches Produkt (Stapf et al.). Im Kontext der stickstofftragenden Polyurethankunststoffe ist die Entstehung toxischer Verbindungen wie HCN und NO_x zu beachten (Kemona und Piotrowska 2020).

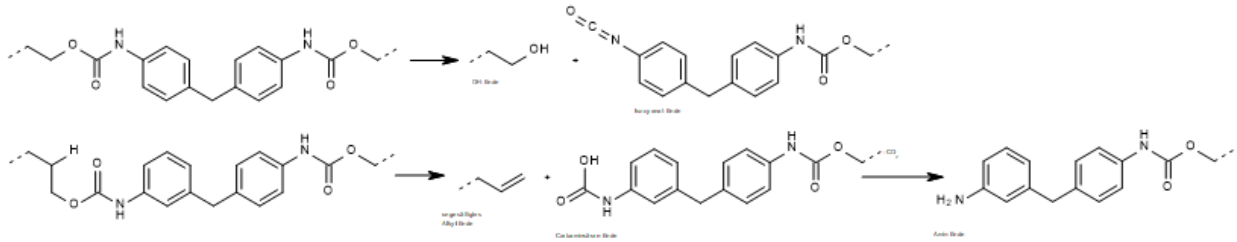
Die Pyrolyse setzt ihre Einsatzstoffe in sauerstofffreier Atmosphäre zu Pyrolysegas, -kondensat und -feststoff um. Es konnte gezeigt werden, dass komplexe Abfallgemische grundsätzlich in Rohstoffe für die chemische Industrie überführt werden können (Zeller et al. 2021). PUR durchlaufen bei der Pyrolyse einen zweistufigen Zersetzungsprozess. Im ersten Schritt bei Temperaturen bis ca. 350°C findet der Zerfall des Urethans statt. Die Depolymerisation zu einer Hydroxyl- und einer Isocyanatgruppe läuft dabei parallel zum Zerfall zu einer Amingruppe und der Abspaltung von CO_2 ab (Abbildung 182)Welcher dieser beiden Zerfallsmechanismen bevorzugt abläuft, hängt von den Reaktionsbedingungen und der Struktur des entsprechenden PUR ab (Abbildung 183) (Kumagai et al. 2017; Nishiyama et al. 2020; Ravey und Pearce 1997; Garrido und Font 2015).

Abbildung 182: Zersetzungsprozess von Polyurethan-Hartschaum.



Quelle: Eigene Versuchsdaten, KIT-ITC.

Abbildung 183: Zersetzungsprozess von Polyurethan-Weichschaum.



Quelle: Eigene Darstellung, KIT-ITC, nach Kumagai et al. (2017).

Im zweiten Schritt des Zersetzungsprozesses werden die Polyolketten gebrochen und entsprechende charakteristische, kürzerkettige Produkte gebildet. Freigesetzte Verbindungen aus diesem Zersetzungsschritt sind Ether sowie aromatische und aliphatische Kohlenwasserstoffe (Garrido et al. 2016). In Abhängigkeit der Pyrolysebedingungen ist zudem die Bildung toxischer Verbindungen wie HCN relevant (Garrido et al. 2017; Grittner et al. 1993). In mehreren Forschungsarbeiten wurde die Bildung eines gelben Rauchs beobachtet, dessen Entstehung auf Gasphasenreaktionen der primären Pyrolyseprodukte zurückgeführt werden kann (Ravey und Pearce 1997). Ebenso kommen die teils hochreaktiven Zerfallsprodukte bei der Kondensation miteinander in Kontakt, was die Produktbeschaffenheit und -zusammensetzung

beeinflussen kann. Die zu gewinnenden Produkte weichen daher z. T. deutlich von den in den primären Zerfallsreaktionen freigesetzten Produkten ab (Grittner 1994). Die Polyurethan-Pyrolyse wurde bisher größtenteils nur in Laborexperimenten untersucht. Im technischen Maßstab relevante Zerfallsmechanismen, Sekundärreaktionen in der Gasphase und die Bestimmung kritischer mikro- und makroskopischer Einflussparameter auf das Zerfallsverhalten sind Gegenstand aktueller Forschungsarbeiten.

6.8 Lacke und Beschichtungen

Lacke und Beschichtungen von Rotorblättern müssen härtesten Bedingungen standhalten, und dies über die gesamte Betriebszeit von 20 Jahren. Um den Wartungsaufwand minimal zu halten, müssen diese Beschichtungen äußerst stabil und witterungsbeständig sein. Als Witterungseinflüsse sind zu benennen: Schnee, Regen, Hitze, UV-Strahlung, Hagel und Sand. Aber auch anderen Stressfaktoren ist Rechnung zu tragen, da sich die Rotorblätter unter deren enormer Krafteinwirkung stark verbiegen und Lastwechselzahlen von über 10^9 in der 20-jährigen Betriebszeit ausgesetzt sind. Hierzu wurden Spezialbeschichtungen entwickelt, die sich flexibel verhalten, damit Spannungsrisse und Aufplatzungen auch unter starker Verformung vermieden werden (Deutsches Lackinstitut 2021).

Rotorblätter verfügen über High-Tech-Beschichtungen meist auf Polyurethan-Basis, die eine hohe Beständigkeit gegen Abrieb und UV-Strahlung aufweisen und teils ohne organische Lösemittel bei deren Verarbeitung auskommen. Um Reflexionen des Sonnenlichts zu vermeiden, was zum sogenannten „Discoeffekt“ führen kann, werden allgemein matte Lacke eingesetzt.

Rotorblätter werden meist mehrstufig lackiert, wobei zuvor eine Entfernung anhaftender Trennmittel aus dem Produktionsprozess notwendig sind, wozu die Blattoberflächen geschliffen werden können. Danach wird ein sogenanntes Gelcoat aufgetragen, das das Blatt vor Umwelteinflüssen wie Feuchtigkeit und Licht schützt. Ein Kantenschutz gegen Verschleiß sowie ein Decklack vervollständigen den Lackiervorgang.

Bei Geschwindigkeiten bis zu 350 km/h an den Flügelspitzen wirken Regentropfen abrasiv. Fraunhofer IWES hat hierzu einen Prüfstand im Projekt "Entwicklung einer Methode zur Bestimmung der Lebensdauer von Rotorblatt-Beschichtungen (BeLeb)“, entwickelt und aufgebaut. Dabei wurden in Langzeitstudien Schädigungsverläufe unterschiedlich beschichteter Rotorblätter von Offshore-Anlagen mithilfe von Highspeed-Kameras und einem laserbasierten Inspektionssystem dokumentiert und ausgewertet. Durch den Abgleich mit einer CFD-Simulation sollte ein Material- und Schadensmodell entwickelt werden (FarbeundLack 2017).

Spezielle Rotorblatt-Beschichtungen werden von etlichen Lackherstellern entwickelt, unter anderem von BASF mit deren Bezeichnung RELEST Wind LEP S. Dieses Produkt soll sich gegen Regenerosion bewährt haben, wobei die Beschichtung auch bei Geschwindigkeiten von bis zu 570 km/h Regentropfen ohne Schäden standhalten soll. Diese Rotorblatt-Beschichtung besteht aus Gelcoat, Spachtel, Kantenschutz und Decklack, wobei das Material nahezu lösemittelfrei und robust gegen UV-Strahlung sein soll (Windbranche.de 2016; BASF 2016). Im technischen Datenblatt zu RELEST® Wind LEP ETU Cartridge wird eine Trockenschichtdicke von 400 µm auf planen Flächen angegeben, was einer Ergiebigkeit von etwa 0,5 kg/m² entspricht, wobei es sich um ein Zweikomponentensystem mit einer Bindemittelbasis aus Polyurethan handelt, das mit dem entsprechenden Härter zu verarbeiten ist (BASF Coatings GmbH 2015).

Von der Firma Teknos (Finnland) sind ähnliche Informationen erhältlich, welche gleichfalls eine Produktpalette für eine mehrlagige Beschichtung als Zweikomponentensystem auf PU-Basis anbieten (Teknos; Teknos).

Solche Zweikomponenten-Deckbeschichtungen für Rotorblätter härten nach der Verarbeitung aus; eine Abtrennung für eine Verwertung ist mit vertretbarem Aufwand nicht realisierbar. Eine hochwertige Verwertung bedingt allgemein ein sortenreines Material, wobei der Anteil der Beschichtung bezogen auf die Gesamtmasse des Rotorblatts im Bereich von 1 bis 3 % liegen soll (Albers et al. 2021a). Somit handelt es sich bei den Lacken und Beschichtugnen mengenmässig um keinen relevanten Stoffstrom bezüglich der gesamten Rotorblattabfallmenge. Da keine Verfahren einer Abtrennung und einer Verwertung bekannt sind, ist auch keine weitere Darstellung hierzu möglich, und die Verwertung der Lacke und Beschichtungen sollte in Kombination mit dem GFK erfolgen.

Die Pyrolyse von GFK wird sich voraussichtlich wegen des geringen Erlöses für rGF kommerziell nicht etablieren können. Bei der Verwertung der Rotorblattabfälle können im Zementwerk mit Ausnahme von CFK und Metallen alle restlichen Rotorblattabfallmaterialien (GFK, Schäume, Balsaholz, Lacke und Beschichtungen) gemeinsam verwertet werden.

Allgemein sind Rotorblätter mehrschichtig lackiert, wobei es sich maßgeblich um PU-basierte Zweikomponentensysteme handelt, deren Decklack zur Reduzierung von Reflektionen eine matte Oberflächenstruktur und eine weiße Lackierung besitzen. Das wichtigste Weißpigment ist noch immer Titandioxid, da es im vergleich zu anderen Weißpigmenten den höchsten Brechungsindex besitzt. Deshalb sollte bei der Verwertung von Rotorblattabfällen darauf geachtet werden, dass es nicht zur Freisetzung bzw. Anreicherung dieses bzw. anderer Problemstoffe kommt. Insbesondere das nanopartikuläres Titandioxid wurde vor Kurzem von der EU als *„Stoff mit Verdacht auf krebserzeugende Wirkung beim Einatmen“* eingestuft. Diese strenge Einstufung von Titandioxid (TiO_2) kann Auswirkungen auf Prozessketten haben, von der Herstellung über die Verarbeitung bis hin zur Verwertung, was auch die Abfallwirtschaft und Recyclingbetriebe betreffen kann (Conversio 2019).

In der Kunststoffverarbeitung liegen homogene und definierte Produkte vor, was für den Abfallbereich nicht der Fall ist, wo inhomogene Abfallströme mit teils erhöhtem Anteil von Fremdmaterialien vorliegen. Dabei gibt es bisher nur wenige Untersuchungen zur Abfallanalyse bezüglich deren TiO_2-Gehalt (Conversio 2019). Die Conversio-Studie enthält Abschätzungen zum Anteil von Titandioxid in Kunststoffen, wobei sich der Kunststoffverbrauch in Deutschland 2017 export- und importbereinigt auf insgesamt etwa 11,8 Mio. t Kunststoffe belief, welche etwa 120 kt TiO_2 enthielten, was bezogen auf alle Kunststoffapplikationen einem durchschnittlichen TiO_2-Gehalt von ca. 1 % entspricht. Die Rotorblattbeschichtung trägt im Mittel mit etwa 1 Gew.-% zum Gesamtgewicht eines Rotorblatts bei. Unter dieser Annahme kann abgeschätzt werden, dass der Anteil an TiO_2 als Weißpigment bezogen auf die gesamte Rotorblattmasse bei etwa 0,01 % liegt.

Untersuchungen zum Verhalten von TiO_2 in Abfallströmen einer Hausmüllverbrennungsanlage und einer Klärschlammverbrennungsanlage, die im Rahmen einer UBA-Studie durchgeführt wurden (Börner et al. 2016), zeigen, dass es über den Abgasstrom zu keiner Freisetzung in die Umwelt kommt. Aus solchen Untersuchungen kann abgeschätzt werden, dass die Gesamtstaubkonzentration im Abgasstrom am Kamin unter 1 mg/m³ liegt, sodass die Titankonzentration unter 0,05 mg/m³ liegen sollte. Der überwiegende Anteil des wiedergefundenen TiO_2 befand sich bei diesen Untersuchungen in den festen Rückständen der Kesselasche und der Adsorberrückstände. Bei der energetischen Verwertung solcher Abfallströme sollte dahingehend auf eine Anreicherung in Reststoffen geachtet werden.

Wie für Lacke und Beschichtungen dargelegt, aber auch für Klebstoffe und Schäume zutreffend, ist eine sortenreine Trennung für eine nachfolgende hochwertige Verwertung schwierig

realisierbar. Da es für diese Materialien keine geeigeneten materialspezifischen Recyclingprozess gibt, ist deren Verwertung im Materialverbund zweckmässig.

6.9 Bewertung zur Verwertung faserförmiger Abfälle

Bezüglich der Verwertung faserförmiger Abfälle muss zwischen dem Recycling und einer schlussendlichen Entsorgung von EoL-Produkten unterschieden werden. Beim Recycling können gleichfalls Abfallfraktionen anfallen, die nicht weiter verwertbar sind und einer Entsorgung zugeführt werden müssen.

6.9.1 TRL-Bewertung von Prozessen der Verwertung

Der TRL eines Prozesses spielt eine wichtige Rolle und gibt an ob dieser kommerziell schon verfügbar ist (TRL = 9), oder welcher Aufwand noch besteht, um den Prozess auf einen Reifegrad für dessen Markteinführung zu entwickeln.

Bezüglich des Reifegrads der Prozesse gibt es in den Literaturangaben eine weitgehende Übereinstimmung, wobei die angegebenen Daten meist nur um eine Stufe variieren. Eine einfache TRL-Einteilung ist in Bennet (2021) nach mechanischen, thermischen und chemischen Prozessen enthalten. TRL 9 erreichen hier nur drei Prozesse, wie das mechanische Recycling (Partikelrecycling), die Zementroute für GFK und das thermische Recycling (Pyrolyse) von CFK. Die meisten anderen Prozesse liegen im Bereich von TRL 4 bis 6.

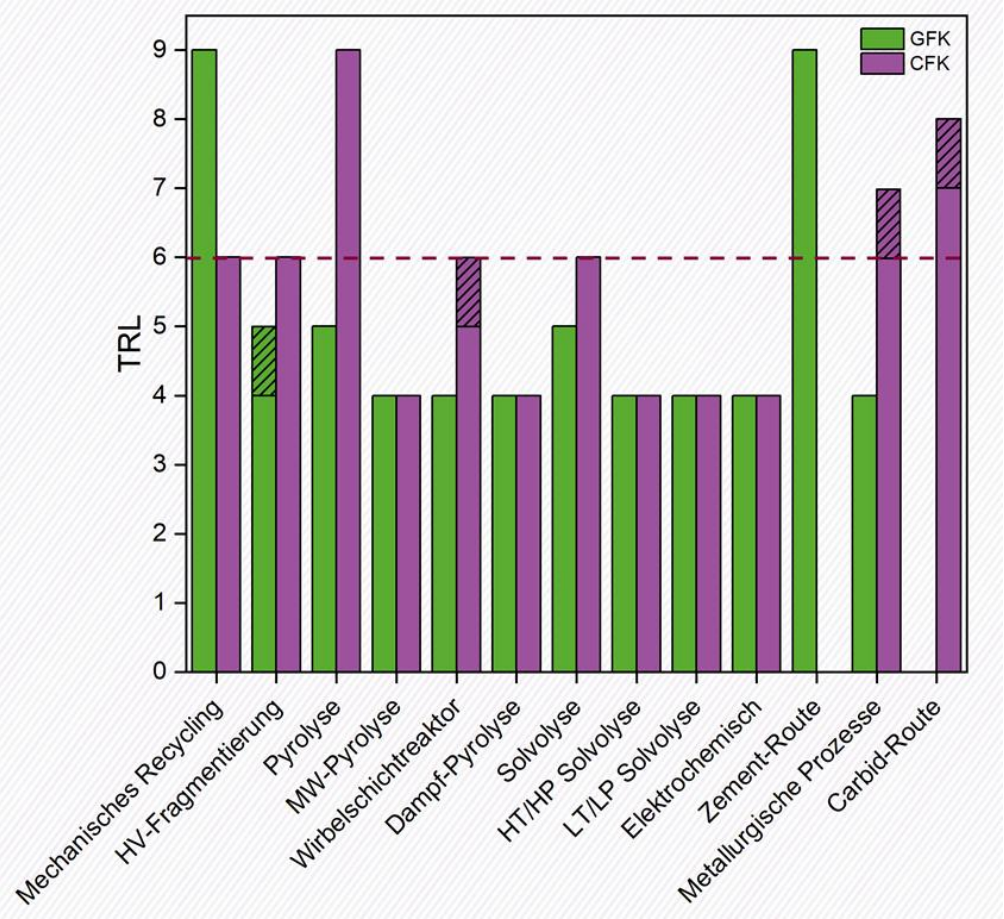
Für alle recherchierten Verwertungsprozesse wurden die Reifegrade, getrennt für GFK und CFK, ermittelt und in Tabelle 79 bzw. Abbildung 184 dargestellt.

Tabelle 79: Technischer Reifegrad (TRL) der Verwertungsprozesse für GFK und CFK.

Recycling-Prozess	TRL für GFK	TRL für CFK
Mechanische Zerkleinerung	9	6
HV-Fragmentierung	4 - 5	6
Zement-Route	9	-
Carbid-Route	-	7 - 8
Metallurgische Prozesse	4	6 - 7
Pyrolyse	5	9
MW-Pyrolyse	4	4
Wirbelschichtreaktor	4	5 - 6
Dampf-Pyrolyse	4	4
Solvolyse	5	6
HT/HP Solvolyse	4	4
LT/LP Solvolyse	4	4
Elektrochemisch	4	4

Quelle: Eigene Zusammenfassung, KIT-ITC.

Abbildung 184: Reifegrad der eingesetzten Recycling-Prozesse für GFK und CFK.



Quelle: Eigene Darstellung, KIT-ITC.

6.9.2 Bewertung des Energiebedarfs von Verwertungsprozessen

Neben dem Reifegrad eines Verwertungsprozesses ist desen spezifischer Energiebedarf eine weitere wichtige Größe zur Prozessbewertung. Analog zum Reifegrad wurden diesbezüglich die in der Literatur verfügbaren Werte recherchiert und sind in Tabelle 80 zusammengefasst.

Tabelle 80: Spezifische Energiebedarfe der Verwertungsprozesse für GFK und CFK.

Verwertungsprozess	Material	Spezifischer Energiebedarf [MJ/kg]	Bemerkung	Literatur
Mechanisches Recycling	GFK	0,17 – 1,93	Durchsatz: 150 – 10 kg/h; Wittmann-Schneidmühle	(Shuaib und Mativenga 2016b)
Mechanisches Recycling	GFK	6,7	Durchsatz: 1,2 kg/h Wittmann-Schneidmühle	(Mativenga et al. 2016)
Mechanisches Recycling	CFK	0,27 – 2,03	Durchsatz: 150 – 10 kg/h; Wittmann-Schneidmühle	(Howarth et al. 2014)
HV-Fragmentierung	GFK	16,2 – 89,1	500 – 2000 elektrische Empulse; Durchsatz: 0,15 – 0,04 kg/h	(Mativenga et al. 2016)

Verwertungsprozess	Material	Spezifischer Energiebedarf [MJ/kg]	Bemerkung	Literatur
HV-Fragmentierung	CFK	4,32	Durchsatz: 5,65 kg/h	(Weh 2015a)
Wirbelschicht	CFK	6	Durchsatz: etwa 12 kg/h	(Meng et al. 2017); (Pickering et al. 2015)
Wirbelschicht	CFK	15 - 30	Beschickungsrate: 5 – 10 kg/hm2	(Pickering et al. 2015)
Pyrolyse	CFK	30	k. A	(Witik et al. 2013)
Pyrolyse	GFK/CFK	2,8	k. A	(Song et al. 2009)
Pyrolyse	CFK	10,32 – 35,71	k. A.	(Carberry 2008)
MW-Pyrolyse	CFK	10	Durchsatz: 1,35 kg/h	(Suzuki und Takahashi 2005)
Solvolyse	CFK	63 - 91	Durchsatz: etwa 3,81 – 0,39 kg/h	(Shibata und Nakagawa 2014)
Solvolyse	CFK	19,2	Durchsatz: 1,03 kg/h	(Keith et al. 2016)

Quelle: Eigene Zusammenstellung, KIT-ITC.

Für einen grobenÜberblick können die in Bennet (2021) dargestellten Werte herangezogen werden, die in Abbildung 185 um die obengenannten Literaturwerte ergänzt wurden. Demnach haben mechanische Recyclingprozesse abhängig vom Zerkleinerungsaggregat, Verwertungsmaterial und Durchsatz mit 0,1 bis maximal 6,7 MJ/kg den geringsten Energiebedarf, jedoch mit einer erheblichen Bandbreite.

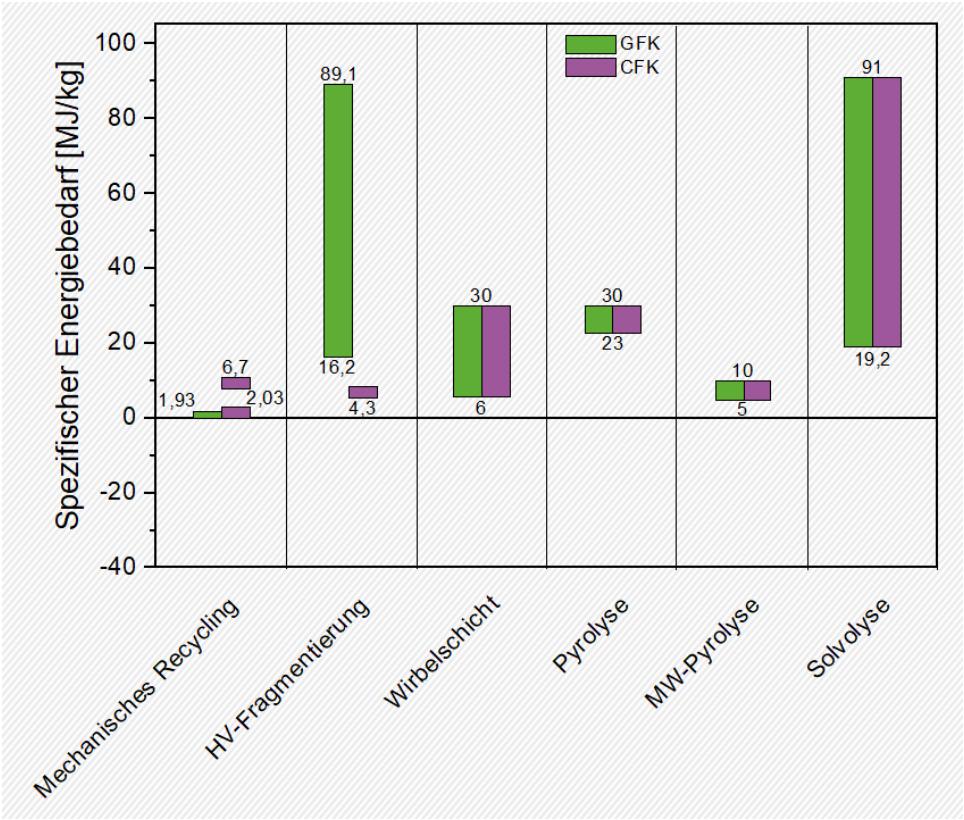
Die HV-Fragmentierung weist abhängig von der Anzahl der elektrischen Impulse einen spezifischen Energiebedarf zum Recycling von GFK zwischen 16,2 bis maximal 89,1 MJ/kg auf (Mativenga et al. 2016), wobei in einer EDF-Pilotanlage ein spezifischer Energiebedarf von 4,32 MJ/kg bei einem Durchsatz von 5,65 kg/h CFK erzielt werden konnte (Weh 2015a).

Der spezifische Energiebedarf einer Wirbelschicht ist in erster Linie von der Beschickungsrate des Aufgabeguts pro Wirbelschicht-Flächeneinheit und der Leckluftrate in den Prozess bzw. der Wärmerückgewinnung des Systems abhängig und wird in der Literatur zwischen 6 bis 30 MJ/kg angegeben (Pickering et al. 2015; Meng et al. 2017).

Die Pyrolyse liegt im Bereich von 23 bis 30 MJ/kg und für die MW-Pyrolyse werden Werte zwischen 5 bis 10 MJ/kg angegeben (Suzuki und Takahashi 2005). Der Unterschied bezüglich des spezifischen Energiebedarfs der konvetionellen Pyrolyse zur MW-Pyrolyse könnte sich aus der selektiven Materialerhitzung der Mikrowellentechnik ergeben. Ein erheblicher Unterschied dieser beiden Prozesse besteht im TRL und für die kommerziell betriebene ELG-Pyrolysenanlage wird ein Energiebedarf von 28 MJ/kg angegeben.

Am energieintensivsten sind die Prozesse der Solvolyse, deren spezifische Energiebedarfe in der Literatur mit 19,2 bis 91 MJ/kg angegeben sind, abhängig von den jeweiligen Verfahrensparametern und Einsatzstoffen.

Abbildung 185: Spezifische Energiebedarfe der eingesetzten Recycling-Prozesse für GFK und CFK.



Quelle: Eigene Darstellung, KIT-ITC.

6.9.3 Bewertung von Produkten des Recyclings

6.9.3.1 Bewertung der Produkte des GFK-Recyclings

Die Verwertung von GFK zur Gewinnung von rGF konnte sich bisher am Markt nicht etablieren, da der Preis für Glasfaserneuware sehr gering ist. Allgemein werden E-Glasfasern für GFK-Produkte verwendet, wobei solche Glasfasern teils in Fernost hergestellt und mit Zöllen belegt sein können. Eine erhöhte Nachfrage nach Glasfasern, bei gleichbleibender Herstellungskapazität, hat in den letzten Jahren zu einem nicht unerheblichen Preisanstieg für Glasfasern geführt. Wurde GF noch vor Jahren mit einem Preis von etwa 1 €/kg (Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) 2019) gehandelt, so muss heute mit einem Preis von 2 - 3 €/kg gerechnet werden. Trotz dieses Preisanstiegs für GF-Neuware sind Kosten und Qualität von rGF für eine Etablierung eines Recyclingprozesses weiterhin sehr ungünstig. Ein GFK-Recycling mittels Pyrolyse oder Wirbelschichtreaktor ist wie für CFK technisch realisierbar, konnte sich aber nicht am Markt etablieren. Ist eine Faser- / Matrixtrennung mittels Pyrolyse zur Gewinnung von rGF angestrebt, so muss mit Kosten von etwa 5 €/kg gerechnet werden (Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) 2019). Für rGF könnte es Optionen für deren Einsatz geben, wobei ein hochwertiges Recycling deren Einsatz in neuen Produkten bedingt, aber die Materialkennwerte von rGF teils deutlich unterhalb derer von Neufasern liegen.

Eine Einsatzmöglichkeit von rGF besteht als Kurzfaser oder Ersatzfüllstoff in thermoplastischen Produkten (Wuppertal Institut, SKZ 2021).

Eine Option zur GFK-Verwertung stellt deren Einsatz in metallurgischen Prozessen dar, mit dem Ziel eine Glasphase abzutrennen und diese für Glasprodukte zu nutzen. Solche Prozesse

befinden sich teils im Anfangsstadium der Entwicklungsphase, wobei es bisher nur erste Forschungsprojekte gibt.

6.9.3.2 Bewertung der Produkte des CFK-Recyclings

Zur Bewertung der CFK-Pyrolyse ist eine eingehende Betrachtung der Produkte, die aus rCF hergestellt werden können sowie deren Anwendungen notwendig. Hierzu ergeben sich verschieden Fragestellungen, die zu berücksichtigen und nachfolgend adressiert sind:

- Welcher Wert steckt in diesem Recyclingmaterial?
- Was sind die Vor- und Nachteile dieser Materialien, und wie werden sie richtig eingesetzt?
- Welche mechanischen Kennwerte lassen sich mit Kurz- bis LangfaserMaterialien erreichen?
- Wie schneiden die rCF-Materialien ökonomisch und ökologisch im Vergleich zu Neuware ab?

Die Firma Mitsubishi Chemical Advanced Materials GmbH (vormals Carbonxt GmbH) vertreibt seit mehr als 10 Jahren unterschiedliche Produkte aus rCF. Abbildung 186 zeigt hierzu das aktuelle Produktportfolio der Firma carboNXT GmbH.

Von Mikro- über Kurzfaser- (µm bis mm) bis zu Langfaserprodukten (cm) und Vliesen, werden Materialien mit sehr unterschiedlichen Eigenschaften und Anwendungsmöglichkeiten angeboten. Dabei kann gesagt werden, dass mit zunehmender Faserlänge das Potential für eine größere Wertschöpfung zunimmt. Während die Kurzfaserprodukte mit Faserlängen im Sub- bis Millimeterbereich in Compounds als Füllstoffe eingesetzt werden, um z. B. die elektrische Leitfähigkeit anzupassen oder Steifigkeiten zu verbessern, können Langfaserprodukte in strukturellen Leichtbauanwendungen zum Wiedereinsatz kommen und eine echte Alternative zu neuen GF- oder Aluminiummaterialien in Leichtbauanwendungen sein.

Abbildung 186: Unterschiedliche Produkte aus recycelten Carbonfasern.

Quelle: Mitsubishi Chemical Advanced Material GmbH, Erlaubnis zur Nutzung der Grafik liegt vor.

Vliese sind eine Produktform, die eine sehr hochwertige Wiederverwendung der rCF in strukturellen Anwendungen ermöglichen können. Grundsätzlich sind Fasern mit einer Länge von ca. 20 bis 150 mm zu Vliesen verarbeitbar. Es existieren sowohl trockene Vliesbildungsverfahren (Krempel und Airlay), als auch nasse Verfahren (Nassvliesanlage mit Ausnutzung des hydrodynamischen Prinzips) zur Herstellung von Vliesstoffen. Für alle

Verfahren müssen die drei wesentlichen Verfahrensschritte der Faservorbereitung bzw. -auflösung, der Vliesbildung sowie der Vliesverfestigung erfolgen. Um möglichst hochwertige Vliese aus rCF herzustellen, muss eine möglichst hohe Faserausrichtung (Anisotropie) bei gleichzeitig möglichst geringer Faserschädigung erreicht werden (Schumm 2021).

Neben Vliesen gibt es weitere Produktformen, bei denen schon thermoplastische Matrix-Fasern in das textile Halbzeug mit eingearbeitet werden, um später eine Benetzung der Fasern zu erleichtern. Bei der Vliesherstellung wird ein Gemisch aus Thermoplastfasern (z. B. PA6) und rCF verarbeitet, wobei im Anschluss durch einen Streckprozess eine weitere Ausrichtung der Fasern erreicht wird. Bei der anschließenden Konsolidierung wird das Thermoplast-Material aufgeschmolzen und zur Erhöhung des Faservolumengehalts verdichtet. So können hochorientierte, thermoplastische Tapes hergestellt werden, die mit klassischen Fertigungsmethoden (z. B. Automated Fiber Placement) zu neuen Bauteilen verarbeitet werden können. Eine Herstellung von duroplastischen Tapes mittels Harzinfusion ist ebenfalls möglich (Rimmel et al. 2019). Eine weitere Produktform sind Stapelfasergarne, und zu deren Herstellung werden Vliese aus Thermoplastfaser-/rCF-Gemisch in einem Umwindespinnverfahren zu einem Garn weiterverarbeitet, bei dem die rCF im Kern möglichst unverdreht parallel zur Garnachse vorliegen und von außen mit einem Thermoplast-Filament spiralförmig zur Verdichtung und Fixierung ummantelt werden. Stapelfasergarne können direkt weiterverarbeitet oder durch eine Konsolidierung zu flachen Tapes verpresst werden (Goergen et al. 2017).

Es ist wichtig, die oben beschriebenen Produkte aus rCF als eigenständige, neue Produktklasse zu betrachten. Durch einkürzte Faserlängen im Vergleich zu neuen Endlosfasern sind grundsätzlich geringere mechanische Eigenschaften erreichbar, auch wenn durch die o. g. Verfahren zur Ausrichtung der rCF bereits sehr gute mechanische Kennwerte (siehe Tabelle 81) erzielen. Bei der Beurteilung der Wertigkeit von Faserhalbzeugen wird oftmals zu Unrecht ein alleiniges Augenmerk auf die Faserlänge gelegt. Die Verwendung von Kurz- bis Langfaserhalbzeugen bringt im Vergleich zu Endlosfasern auch Vorteile mit sich (Schlichter 2021):

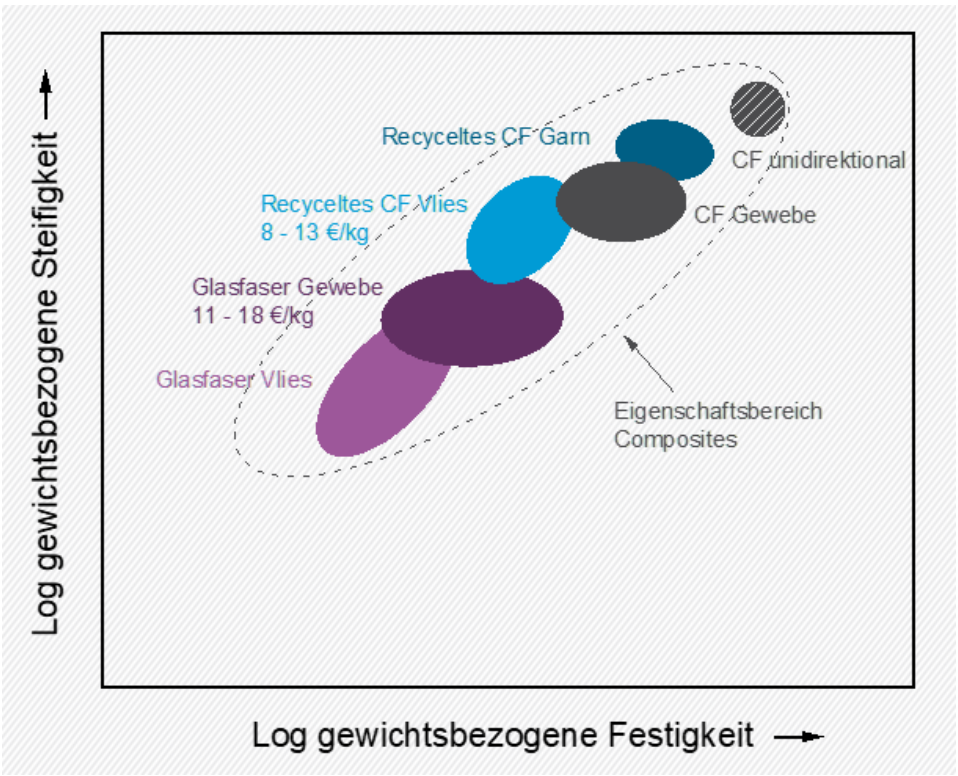
- Durch eine gute und schnelle Verarbeitbarkeit (z. B. im Hybrid-Moulding, Resin Transfer Moulding (RTM), Heißpressverfahren) lassen sich hohe Stückzahlen realisieren.
- Bessere Drapierbarkeit und damit Anpassung an stark gekrümmte Flächen und enge Radien
- 3D/Dickeneffekte leicht umsetzbar in Pressprozessen (z. B. Ausfüllen von Rippen durch das Material)
- Einfache Funktionalisierung des Materials (z. B. Einstellung der Biegesteifigkeit vs. Zugsteifigkeit durch unterschiedlich starke Konsolidierung des Materials)
- Flexible, variable Faserorientierungen möglich (Anpassungen der Faserorientierung im Pressprozess)
- Einfache, passgenaue Anpassung von Materialeigenschaften durch Fasermischungen bzw. unterschiedliche Faser-/Matrixgehalte.

Durch eine Konzentration auf diese spezifischen Vorteile von Faserhalbzeugen aus rCF in der Design- und Entwicklungsphase von neuen Bauteilen und den Einsatz bei sinnvollen Anwendungen kann ein Downcycling bei der Wiederverwendung des Materials vermieden werden. Hierbei ist es auch wichtig, ein branchenübergreifendes Denken zuzulassen: Recycelte CF aus einem Windrotorgurt sind aufgrund der benötigten hohen linearen Festigkeiten und Steifigkeiten nur sehr bedingt wieder für Zug-Gurte von neuen Windrotorblättern einsetzbar.

Aufgrund der sehr guten Verarbeitbarkeit und Funktionalisierbarkeit von z. B. ausgerichteten Vliesen aus rCF eignen sich diese jedoch gut für den Einsatz in z. B. Automobilanwendungen wie einem Batteriekasten, der dann im Vergleich zum Zug-Gurt kein minderwertiges Bauteil darstellt.

Das Leichtbaupotential von textilen rCF-Faserhalbzeugen im Vergleich zu GF-Halbzeugen und Neufaserprodukten aus CF ist in Abbildung 187 dargestellt. Dargestellt ist der Eigenschaftsbereich für Composites, abgebildet in Abhängigkeit der logarithmischen gewichtsbezogenen Steifigkeit und der logarithmischen gewichtsbezogenen Festigkeit. Es wird deutlich, dass Produkte aus rCF im Vergleich zu anderen Leichtbaumaterialien attraktive mechanische Eigenschaften erreichen. Gerichtete Vliese aus rCF weisen ähnliche spezifische Festigkeiten wie GF-Gewebe bei größeren Steifigkeiten auf. Vliesen aus GF sind sie deutlich überlegen. Auch preislich sind rCF-Vliese mit ca. 8 bis 13 €/kg im Vergleich zu GF-Geweben attraktiv. Garne aus rCF erreichen durch die höhere Ausrichtung der Fasern noch höhere Kennwerte. Stapelfasergarne und hieraus hergestellte, hochausgerichtete Tapes können sehr hohe spezifische Festigkeiten und Steifigkeiten erreichen, die sogar über denen eines CF-Gewebes aus Endlos-Neufasern liegen können (Schlichter 2021). Durch eine optimale Ausrichtung der Fasern in den Stapelfasergarnen kann bis zu 86 % der Festigkeit einer unidirektionalen Einzelschicht aus Endlosfasern erreicht werden (Goergen et al. 2017; Hasan et al. 2018).

Abbildung 187: Leichtbaupotential von textilen Produkten aus rCF im Vergleich zu anderen Leichtbaumaterialien.



Quelle: Eigene Darstellung, KIT-ITC, nach Schlichter, S., ITA Augsburg, auf Basis von Daten des Fraunhofer IGCV.

Zur Betrachtung absoluter Werte eignet sich die Benchmark-Studie von Schumm (2021), wobei Teile des Inhalts bereits im Rahmen einer Präsentation von Witte et al. (2021) veröffentlicht wurden. Die Studie fasst eine große Breite an erzielbaren mechanischen Eigenschaften für unterschiedliche Materialien aus rCF zusammen. Die Proben, zumeist bestehend aus rCF/PA6 –

Verbundwerkstoffen, wurden mit unterschiedlichen Textilverfahren hergestellt, die eine verschieden starke Ausrichtung der Fasern zur Folge hatte. Hierbei sind die erzielten mechanischen Eigenschaften stark abhängig vom Grad der Ausrichtung. Ein an den Vliesbildungsprozess nachgeschalteter Streckprozess des Textils führt zu deutlich besseren mechanischen Eigenschaften. Der Grad der Ausrichtung bestimmt auch die erzielbaren Faservolumengehalte, die wiederum einen großen Einfluss auf die mechanischen Kennwerte haben. In Tabelle 81 sind Daten für gestreckte Tape-Proben aus rCF/PA6-Verbundwerkstoffen zusammengefasst. Bei der Herstellung wurde ein rCF/PA6 Fasergemisch über einen Kardierprozess (Trockenvliesherstellung mit Krempel) vorausgerichtet und in einem nachgeschalteten Streck- und Konsolidierungsprozess hieraus rCF-Tapes für die Probenproduktion hergestellt.

Tabelle 81: Zusammenfassung erzielbarer mechanischer Kennwerte für gestreckte rCF/PA6-Tapes (Proben 3.1 bis 4.4).

Eigenschaft/Kennwert	Erzielte Datenbereiche
Faservolumengehalt [%]	28,8 – 43,0
Zugfestigkeit [MPa]	460 - 870
Zug-E-Modul [GPa]	44 – 71
Biegefestigkeit [MPa]	530 - 790
Biege-E-Modul [GPa]	38,5 – 68
Druckfestigkeit [MPa]	320 - 500
Druck-E-Modul [GPa]	59 – 83
Schlagzähigkeit (Charpy) [kJ/m2]	33 – 43

Quelle: Eigene Zusammenstellung, Composites United e.V. nach Schumm (2021), Witte et al. (2021).

Bei einer Analyse der Daten in Tabelle 81 fällt die beachtliche Bandbreite auf. Diese kann mit einer Variabilität der Faserausrichtung sowie des Faservolumengehalts in dem hergestellten, ausgerichteten rCF-Tape erklärt werden. Ein weiterer wesentlicher Grund ist auch, dass die Probeplatten händisch aus den rCF-Tapes hergestellt wurden und somit von weiteren Ausrichtungsabweichungen ausgegangen werden muss, die die Bandbreite in den Daten erklären. Es wird zudem deutlich, dass zum Teil beachtliche mechanische Kennwerte erreicht werden, die eine Anwendung der sekundären CF-Produkte in neuen, strukturellen Anwendungen möglich machen. Entsprechend hoch ist das Leichtbaupotential von Produkten aus rCF.

Die Weiterentwicklung von Textiltechnologien zur Herstellung neuer Produkte aus rCF sowie die Entwicklung von Normen und Standards für diese Produkte zur Verringerung der Variabilität sowie zur Generierung verlässlicher Produktinformationen für Designer und Ingenieure für die Anwendung der rCF-Materialien in neuen Produkten sind aktuelle Forschungsthemen. In Projekt „MAI CC4 CaRinA“ („Carbonfaser Recyclingwerkstoffe für industrielle Anwendungen“, Laufzeit März 2017 – September 2020) haben die Projektpartner um das Fraunhofer IGCV an der verbesserten Vliesbildung mit rCF sowie einer besseren Imprägnierung dieser Vliesstoffe mit thermoplastischen Matrices gearbeitet. Weiterhin wurden erstmalig Materialkarten von rCFK aus rCF-Vliesstoffen zur Auslegung von neuen Produkten entwickelt sowie rCF-Materialien in Software-Tools zur Simulation von Bauteilen integriert

(Manis 2021). Dies sind wichtige Schritte hin zu einem regulären Einsatz von CF-Sekundärprodukten in der Industrie. Eine Veröffentlichung des Abschlussberichts steht noch aus.

Neben den erreichbaren mechanischen Eigenschaften sind auch weitere Aspekte von rCF-Produkten für den Wiedereinsatz der Materialien entscheidend. Ein Argument für rCF-Produkte ist der im Vergleich zu Neuware deutlich reduzierte Preis. Laut einer aktuellen Zusammenstellung durch Schlichter (2021) liegt der Preisbereich für rCF aus einer Pyrolyse bei 5 – 11 €/kg. Addiert man die Kosten für die Aufbereitung sowie die Halbzeugherstellung (Vliese und Garne), ergibt sich die geschätzte Preisspanne von 8 bis 13 €/kg aus Abbildung 187. Im Vergleich dazu startet der Preis für neue CF laut Schlichter bei ca. 15 €/kg.

Neben den Kosten ist ein weiteres Argument für die Anwendung von rCF ein im Vergleich zu Neuware deutlich verringerter CO_2-Fußabdruck der Materialien. Im Zuge des Europäischen Green Deals wird das Treibhauspotential ein immer wichtigeres Auswahlkriterium für Materialien zur Erreichung der Klimaneutralität. Laut einer Abschätzung des Fraunhofer IGCV kann das Treibhauspotential von ca. 30 kg CO_2-äqv. pro kg Faser für Neuware auf unter 5 kg CO_2-äqv. pro kg Faser für rCF aus dem Pyrolyse-Prozess reduziert werden (Hohmann und Ilg 2020). Eine Berechnung der Pyrolyse-Anlage von Mitsubishi Chemical Advanced Materials in Wischhafen liefert einen Wert für den aktuellen Prozess von ca. 6 kg CO_2-äqv. pro kg Faser, geringere Werte sind angestrebt (Angerer 2021). In Kombination mit den oben dargestellten, möglichen mechanischen Kennwerten und dem damit verbundenen Leichtbaupotential sind rCF-Produkte somit ein attraktives Material im Kontext der angestrebten Klimaneutralität der Industrie in Europa. Das aktuell laufende Projekt MAI ÖkoCap (Angerer 2021) untersucht auf Basis technischer, ökonomischer und ökologischer Kriterien den Einsatz von recycelten CF mit dem Ziel, die bisherigen Insellösungen für den Einsatz von rCF zu ergänzen, Unsicherheiten abzubauen und Entscheidungshilfen für den Einsatz von rCF-Produkten zur Erreichung einer größeren Marktdurchdringung zu liefern.

Nach Darstellung der erreichbaren mechanischen Kennwerte sowie der ökonomischen und ökologischen Vorteile von rCF, drängt sich die Frage auf, warum die Anwendung von rCF-Produkten nicht bereits in der Industrie etabliert ist. Wie zuvor schon angedeutet hat dies vielschichtige Gründe, u. a.:

- Fehlende Normen und Standards führen zu einer Vielzahl an Herstellungsmethoden für rCF-Halbzeuge und somit auch zu einer großen Bandbreite an mechanischen Daten (siehe Tabelle 81) für diese Materialien. Dies führt zu Unsicherheiten hinsichtlich erzielbarer Bauteilqualitäten.
- Die anfallenden Abfallmengen von CF sind im Vergleich zu anderen Abfallströmen gering, da die meisten Produkte noch im Einsatz sind und End-of-Life Bauteile erst in den nächsten Jahren zunehmen werden (siehe Kapitel 2). Ein wesentliches Kriterium für die Auswahl eines Materials für eine Anwendung ist die Materialverfügbarkeit über die Dauer des gesamten Produktionszeitraums. Diese Verfügbarkeit ist bei rCF-Produkten oftmals noch fraglich bzw. es herrschen große Unsicherheiten. Durch die geringen Abfallmengen ist es zudem für Firmen nicht attraktiv, in Recyclingtechnologien und -kapazitäten zu investieren. Es wird erwartet, dass eine Zunahme der Abfallströme in den nächsten Jahren bezüglich dieser Aspekte positive Auswirkungen haben wird.
- Oftmals werden CFK-Abfälle durch die Presse und die Öffentlichkeit als problematischer Sondermüll eingeordnet, und die oben genannten Potentiale treten in den Hintergrund bzw.

sind unbekannt. Dies verringert die Marktakzeptanz von Produkten aus rCF und erschwert den Wiedereinsatz zur Verbesserung der Zirkularität.

Ein Schlüssel zum Erfolg und zur Überwindung dieser Hindernisse ist eine Steigerung der Attraktivität sowie der Marktakzeptanz von rCF-Materialien. Basis hierfür ist ein umfassender Wissensaufbau, welche Fasern in welchen rCF-Produktformen in welchen neuen Anwendungen ökonomisch und ökologisch sinnvoll wiedereinsatzbar sind. Neben der Generierung dieses Wissens muss es auch konsequent kommuniziert werden, um die Potentiale von rCF-Materialien aufzuzeigen. Projekte wie MAI CC4 CaRinA sowie MAI ÖkoCap leisten hier wichtige Beiträge. Wenn ein stabiler Absatzmarkt für rCF-Produkte entsteht, werden mehr Akteure im Recyclingmarkt mitmischen und Recyclingkapazitäten werden sich erhöhen. Wenn CFK-Abfälle mit einem Wert behaftet sind und dieses den Akteuren entlang der Wertschöpfungskette bewusst ist, werden Firmen aus ökonomischen Gründen auf eine möglichst sortenreine Trennung, Sammlung und Rückführung der Abfälle achten. Laut Mitsubishi Chemical Advanced Materials ist es möglich, CF wiederholt mittels Pyrolyse zu recyclen (Rademacker, 16.06.2021). Zwar wird durch erforderliche Zerkleinerungsprozesse die Faserlänge mit jedem Recyclingprozess eingekürzt, was das Leichtbaupotential der resultierenden rCF-Materialien verringert; dennoch ist ein mehrmaliger, branchenübergreifender Wiedereinsatz in neuen Anwendungen technisch möglich und kann ökonomisch sowie ökologisch sinnvoll sein (s. o.), bevor eine finale Verwertung erforderlich wird. So kann eine CF im Idealfall mehrmals zirkulär eingesetzt werden und über Jahrzehnte in immer neuen Anwendungen ihr Leichtbaupotential ausspielen.

6.9.4 Bewertung kommerziell verfügbarer Prozessketten

Bisher wurden alle Prozesse unabhängig deren TRL, Verwertungskapazität bzw. deren kommerziellen Verfügbarkeit dargestellt. Für die Verwertung von Rotorblattabfällen können nur solche Prozesse vertiefend betrachtet werden, die auch kommerziell mit ausreichender Kapazität verfügbar sind. Dies bedingt Prozesse mit TRL 9 und einer Verwertunskapazität von etwa 30.000 t/a, wobei die entsprechende Menge des jeweils zu verwertenden Materials zu berücksichtigen sind.

Da Rotorblattabfälle zu etwa 80 % aus GFK bestehen, kann hierfür eine Menge von etwa 25.000 t/a angesetzt werden. Der CFK-Anteil bewegt sich aktuell noch deutlich unter 10 %, jedoch mit steigenem Anteil, sodass maximal 3.000 t/a künftig zu erwarten sind.

Ein GFK-Recycling war mit dem ERCOM-Prozess kommerziell in Deutschland installiert, wobei der Prozess sich nicht langfristig am Markt etablieren konnte. Gründe hierfür können neben dem geringen Marktwert auch eine unzureichende Produktqualität gewesen sein, da eine saubere Abtrennung zwischen Faser und Matrix nicht gegeben war.

Die Verwertung aufbereiteter GFK-Abfällen findet in größeren Mengen durch deren Einsatz im Zementwerk statt, was bisher in Deutschland nur in einem Zementwerk erfolgt, das maximal 40.000 t/a an GFK-Abfällen verwerten kann. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass auch weitere GFK-Abfallmengen aus anderen Produkten über diese Route zu Verwertung anstehen.

Die CFK-Verwertung erfolgt durch Recycling mittels Pyroylse, wo es in Deutschland nur eine Anlage mit einer Kapazität von etwa 1.000 t/a gibt, wobei diese Kapazität laut Angaben des Betreibers erhöht werden soll.

6.9.5 Technoökonomische Bewertung von Prozessketten für Rotorblattrecycling

Zu Beginn erfolgt eine Übersicht zu aktueller Literatur im Bereich der technoökonomischen Bewertung von Rotorblattrecycling. Dann folgt die exemplarische Anwendung eines Modells zur Berechnung des ökonomischen Potentials von GF-Recycling. Am Ende werden die Ergebnisse und das Vorgehen kritisch betrachtet und ein kurzer, zusammenfassender Ausblick gegeben.

6.9.5.1 Bewertungsansätze in der Literatur

In der Literatur findet man nur wenige Veröffentlichungen, welche explizit unterschiedliche Recyclingverfahren von Rotorblättern bewerten und einander gegenüberstellen. Eine Übersicht von Bewertungsansätzen ist in Tabelle 82 dargestellt. Besonders ab dem Jahr 2019 finden sich vermehrt Publikationen, die Recyclingmethoden von Rotorblättern und insbesondere deren techno-ökonomische Machbarkeit untersuchen. Weitaus weniger Bewertungsansätze für Rotorblattrecycling beschäftigen sich mit den Umweltfolgen und den Auswirkungen auf die Gesellschaft.

Tabelle 82: Übersicht Bewertungsansätze Rotorblatt Recycling von Windenergieanlagen.

Bewertungs-kategorie	Ökonomie Wirtschaft-lichkeit	Technik Energie-bedarf	Technik Rezyklat-qualität	Technik Kapazität-/ Verluste	Technik TRL	Ökologie Vereinfachte Ökobilanz-ierung	Soziales SDG-basiert
(Deeney et al. 2021)	X	-	-	-	-	X	X
(Sommer und Walther 2021)	X	X	X	X	-	-	-
(Fonte und Xydis 2021)	X	X	X	X	-	-	-
(Rani et al. 2021)	-	X	X	X	-	-	-
(Yang und Pender 2020)	-	-	X	X	-	-	-
(Nagle et al. 2020)	-	X	-	-	-	X	-
(Cooperman et al. 2021)	X	-	-	-	X	-	-
(Cousins et al. 2019)	X	X	-	-	-	-	-
(Liu et al. 2019)	-	X	X	X	-	X	-
(Höfer 2015)	X	X	X	-	-	-	-

Quelle: Eigene Zusammenstellung, KIT-IIP.

Die technische Machbarkeit und ökonomische Zumutbarkeit werden oft priorisiert untersucht, da sie häufig der Planung von Investitionen in neue Technologien und der Entwicklung von Geschäftsmodellen dienen.

Zu den wenigen ökobilanziellen Untersuchungen von EoL-Optionen für Rotorblätter zählen die Publikationen von Nagle et al. (2020) und Liu et al. (2019). Die Veröffentlichung von Nagle et al. (2020) beschreibt eine attributionelle Ökobilanzierung von drei EoL-Optionen für ausgediente Rotorblätter. Damit liegt der Fokus auf der Quantifizierung der Umweltauswirkungen von Prozessen innerhalb eines festen Bezugsystems, wobei Konsequenzen und Folgeeffekte außerhalb des Untersuchungsraumes nicht berücksichtigt werden (Ekvall 2020).

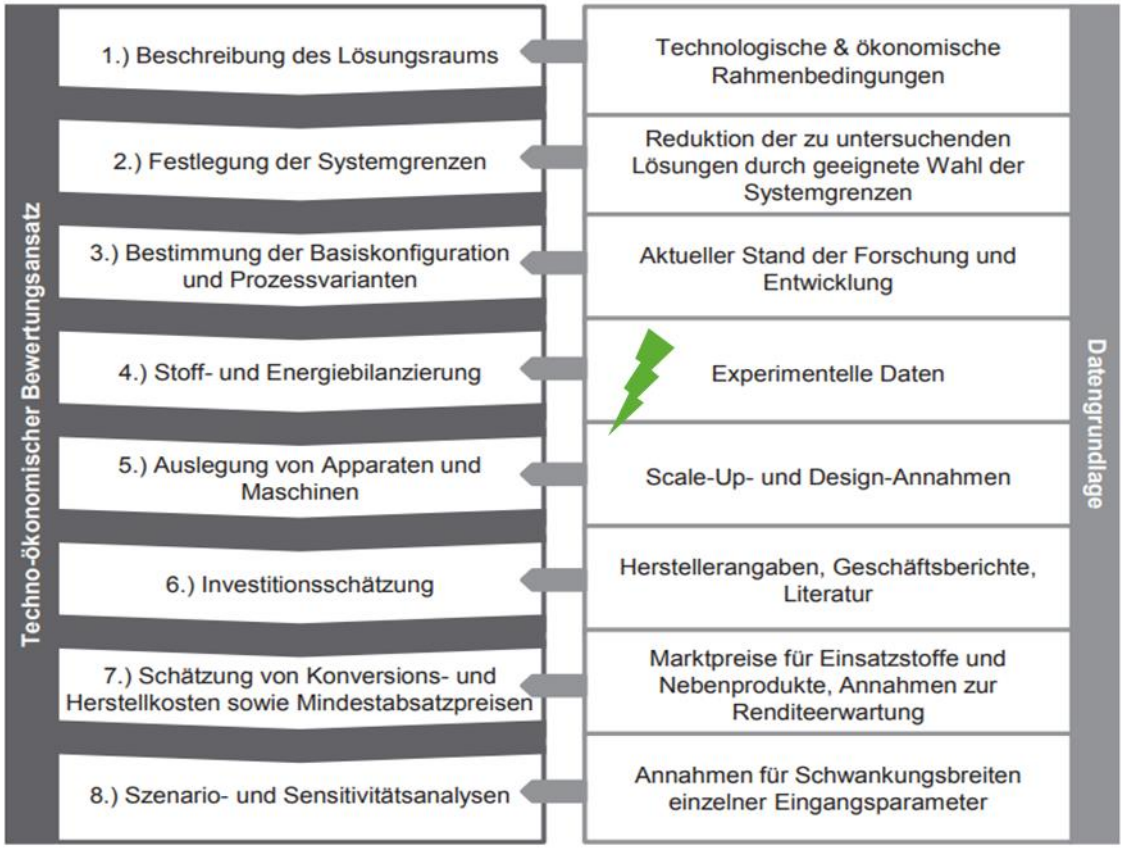
Die Studie von Liu et al. (2019) vergleicht im Rahmen eines vereinfachten Eco-Audits nach Ashby et al. (2009) die Energieverbräuche unterschiedlicher EoL-Optionen von Rotorblättern miteinander. Die Berechnung des Netto-Energieverbrauches entlang des Lebenszyklus eines Rotorblatts setzt sich demzufolge aus den Energieverbräuchen während der Herstellung, des Betriebes inkl. der Wartung sowie der EoL-Option und damit einer möglichen Energierückgewinnung am Ende des Lebenszyklus zusammen. Das zugehörige Berechnungsmodell befindet sich im Anhang (vgl.A.4.4, Abbildung 210).

Eine Möglichkeit, sowohl technoökonomische also auch ökologische und soziale Aspekte im Rahmen einer ganzheitlichen Bewertung gleichzeitig zu berücksichtigen, bietet die Nachhaltigkeitsbewertung. Ein erster Versuch zur Nachhaltigkeitsbewertung für EoL-Optionen von Rotorblättern ist der Bewertungsansatz von Deeney et al. (2021). Diese komplexe und mit größeren Unsicherheiten behaftete Bewertung der EoL-Optionen erfolgt durch ausgewählte und gewichtete ökonomische, ökologische und soziale Nachhaltigkeitsindikatoren. Danach stellt die Weiterverwendung von Rotorblättern als Konstruktionselement z. B. für Möbelstücke oder Brücken eine nachhaltige EoL-Option für Rotorblätter dar. In allen drei Nachhaltigkeitsdimensionen schneidet die EoL Option Weiterverwendung als Konstruktionselement im Möbel- und Brückenbau durch Substitution jeweiliger Primärrohstoffe besser ab, als eine Mitverbrennung im Zementwerk sowie eine energetische Verwertung in Müllverbrennungsanlagen. Die finale Entsorgung des Rotorblatts am Ende des Lebenszyklus als Konstruktionselement wurde jedoch nur bei der Weiterverwendung als Möbelbauteil, jedoch nicht bei der Nutzung als Brückenbauteil in der bilanziellen Bewertung mitberücksichtigt. Daher lassen sich streng genommen die beiden EoL-Optionen nicht vergleichen.

Im noch jungen Forschungsbereich der Nachhaltigkeitsbewertung gibt es sehr wenige Ansätze und keine etablierten Standards, welche für die Bewertung von Rotorblattrecycling herangezogen werden könnten. Dies ist dem Umstand geschuldet, dass viele Annahmen getroffen werden und geeignete Nachhaltigkeitsindikatoren sowie zugehörige Gewichtungen definiert werden müssen. Dieses neue Vorgehen zur ganzheitlichen Nachhaltigkeitsbewertung befindet sich noch in der Entwicklungsphase, weshalb die Ergebnisse aus solchen Bewertungen bislang noch mit größeren Unsicherheiten behaftet sind. Zudem ist eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse mit etablierten Bewertungsverfahren noch nicht gegeben. Daher ist es besonders in frühen Phasen der Beurteilung von noch nicht kommerziell verfügbaren Technologien sinnvoll, anerkannte und bewährte technoökonomische und technoökologische Bewertungsmodelle zu nutzen. Grundlage dafür sind Energie- und Stoffbilanzen, aus welchen sich fundierte ökonomische und ökologische Beurteilungen ableiten lassen. Dabei stellt die Definition der Systemgrenzen und Zwischenprodukte sowie die Datenerhebung einen zentralen und anspruchsvollen Aspekt der Bewertung von Prozessketten des Rotorblattrecyclings dar. Zusätzlich bedarf es zur Erhebung von belastbaren Energie- und Stoffbilanzendaten praktischer Versuche und Messungen, welche sowohl mit einem größeren zeitlichen als auch finanziellen Aufwand verbunden sind. Im Rahmen dieser Studie wurde keine Datenerhebungen zu Energie- und Stoffbilanzen durchgeführt. Daher ist eine ökobilanzielle Betrachtung der unterschiedlichen EoL-Optionen für Rotorblätter nicht Gegenstand dieses Berichtes.

Aufgrund des großen Forschungs- und Informationsbedarf einer Nachhaltigkeitsbewertung gepaart mit der stark eingeschränkten Datenlage zu Verwertungsprozessen von Rotorblättern empiehlt es sich, einen etablierten Bewertungsansatz zur technoökonomischen Analyse (TEA) von Produktionsprozessen zu verwenden. In Abbildung 188 ist eine exemplarische TEA auf Prozessebene dargestellt. Diese teilt sich in die zwei Phasen Modellerstellung (Schritte 1 bis 5) und die darauf aufbauende Wirtschaftlichkeitsrechnung (Schritte 6 bis 8).

Abbildung 188: Methodik der techno-ökonomischen Analyse (TEA) auf Prozessebene.



Quelle: Eigene Darstellung, KIT-IIP, nach Trippe (2013).

In der Modellerstellung werden zunächst der Lösungsraum beschrieben, die Systemgrenzen festgelegt sowie die Basiskonfiguration und die Prozessvarianten definiert. Dann erfolgt die Stoff- und Energiebilanzierung der Basiskonfiguration und der Prozessvarianten sowie die Auslegung von Anlagen. In der Wirtschaftlichkeitsberechnung werden darauf aufbauend erforderliche Investitionen geschätzt sowie weitere Kosten ermittelt und Szenario- und Sensitivitätsanalysen durchgeführt.

Die Abbildung zeigt auch, welche Daten zur Durchführung des jeweiligen Bewertungsschrittes benötigt werden. Eine Schlüsselrolle spielen dabei experimentelle Daten der untersuchten Prozesse zur Erstellung der Energie- und Stoffbilanzen. Die Datengrundlage der hier zu untersuchenden Prozessrouten zur Verwertung von Rotorblättern ist sehr schwierig, da experimentelle Daten öffentlich nicht verfügbar sind und auch keine Energie- und Stoffbilanzdaten innerhalb dieser Studie erhoben wurden. Deshalb verwendet diese Studie überwiegend vereinfachte Annahmen und Angaben aus der Literatur. Dies führt sowohl bei der technischen als auch bei der wirtschaftlichen Beurteilung der Ergebnisse zu größeren Unsicherheiten, die bei der Bewertung hinreichend zu berücksichtigen sind.

In der Literatur wurden mehrere technoökonomische Ansätze zur Bewertung des Rotorblattrecyclings gefunden. Die Bewertungsansätze von Sommer und Walther (2021) und Fonte und Xydis (2021) berücksichtigen bei der TEA sowohl die spezifischen Energiebedarfe und Rezyklatqualitäten[18] als auch prozessbedingte Verluste und Kapazitäten unterschiedlicher Recyclingprozesse. Aufgrund der großen Unsicherheiten bei dem Ansatz nach Deeney et

[18]Der Begriff Rezyklat umfasst sowohl Faserbestandteile (rGF und rCF) als auch Matrixbestandteile nach einer Faserverbundverwertung.

al. (2021) sind diese beiden Ansätze zu bevorzugen. Der Hauptunterschied der beiden TEA-Ansätze besteht im Untersuchungsrahmen der Studien. Die Veröffentlichung von Sommer und Walther (2021) untersucht mithilfe einer Optimierungsfunktion, welche Auswirkungen politische Entscheidungen wie z. B. Recyclingquoten auf die europäische Rotorblattverwertung haben könnten. Als Indikator dient der (makro)ökonomische Gesamtnutzen, welcher sich aus der Summe der Kosten und des Kapitalwerts aus dem Rotorblattrecycling der jeweiligen Prozessrouten sowohl für GFK als auch CFK ergibt. Damit ist der gesetzte Forschungsrahmen der Studie im volkswirtschaftlichen Kontext angesiedelt. Sommer et al. (2021) kommen zu dem Ergebnis, dass die Entwicklung von CFK-Recycling auf europäischer Ebene überwiegend von der Existenz eines möglichen Sekundärmarktes für rezyklierte Carbonfasern (rCF) abhängt. Der technologische und infrastrukturelle Ausbau des CFK-Recyclings aber im Besonderen des GFK-Recyclings hingegen bedarf der Unterstützung von politischen Entscheidungsträgern. Grund dafür ist der im Vergleich zu rCF geringere Wert für rezyklierte Glasfasern (rGF) gekoppelt mit einem verhältnismäßig hohen Recyclingaufwand für rGF. Diese Voraussetzungen stellen keine gute Ausgangslage zur Einführung eines Sekundärmarktes für rGF dar.

Der Ansatz nach Fonte und Xydis (2021) untersucht das technoökonomische Potential im betriebswirtschaftlichen Kontext unterschiedlicher Rotorblattrecyclingprozesse für GFK in exemplarischen Verwertungsanlagen mit jeweils einer Jahresproduktionskapazität von 6000 t Glasfaserrezyklat. Für die betriebswirtschaftliche Analyse muss u. a. der ökonomische Wert des Rezyklats berechnet werden. Dieser liegt nach Fonte und Xydis (2021) zwischen den Gesamtkosten der Rezyklatherstellung und einem maximalen ökonomischen Wert des Rezyklates. Die Differenz aus den Gesamtkosten und dem errechneten maximalen ökonomischen Wert stellt somit in vereinfachter Form den theoretischen Reingewinn dar, der durch den Vertrieb der produzierten Rezyklates erzielt werden kann.

Da zur Entwicklung von nationalen Rückbau- und Recyclingstandards für Rotorblätter die wirtschaftliche Zumutbarkeit relevant ist, wird zur technoökonomischen Bewertung der Ansatz von Fonte und Xydis (2021) in den nachfolgenden Kapiteln 6.9.5.2 und 6.9.5.3 detailliert beschrieben.

6.9.5.2 Berechnung der Recyclingkosten

In der Wirtschaftlichkeitsrechnung wählt Fonte und Xydis (2021) einen vereinfachten Ansatz zur Berechnung des Reingewinns der Recyclingprozesse. Dabei stellen die Gesamtkosten $R_{Wert\ min}$ zur Erzeugung eines Glasfaserrezyklates den minimalen ökonomischen Wert dar. Zur Berechnung (ohne Vorketten) nutzt Fonte und Xydis (2021) die nachfolgende Formel nach Perloff (2018):

$$R_{Wert\ min} = \big((1 + O) \times (C_P + C_E + C_W) + C_A\big) \times (1 + S)$$

Die Parameter der Formel sind nachfolgend aufgelistet und werden näher beschrieben:

C_I Investitionskosten in €

C_E Energiekosten in €

C_P Personalkosten in €/h

C_W Wartungskosten in €

C_A Abschreibung in €

O Faktor Gemeinkosten

S Faktor für Verwaltung, Forschung, Verkauf und Distribution

Die Wartungskosten C_w werden durch die nachfolgende Formel ausgedrückt und für alle Verfahren mit 6 % der Investitionskosten [C_I] angesetzt.

$$C_W = \left(\frac{C_I}{R_a}\right) \times 0{,}06$$

Darin ist R_a das Rezyklat pro Jahr in kg/a.

Zusätzlich sind die Kosten der Wartung C_w abhängig von der Menge an produziertem Rezyklat R_a. Bei einer angenommenen 5-Tage-Woche mit 24h-Schichten ergibt sich der Zusammenhang zwischen Durchsatz pro Stunde R_h (in kg/h) und der jährlich produzierten Rezyklatmenge nach der Formel:

$$R_a = R_h \times (24 \times 5 \times 52)h$$

Auf Details zur produzierten Menge an Rezyklat R_a sowie prozessbedingte Verluste wird im Kapitel 6.9.5.4 näher eingegangen. Die Berechnung der jährlichen Abschreibung C_A wurde mit 10% der prozessspezifischen Investitionskosten C_I berücksichtigt und ist abhängig von der jährlich produzierten Rezyklatmenge.

$$C_A = \left(\frac{C_I}{R_a}\right) \times 0{,}1$$

6.9.5.3 Berechnung des Rezyklatwertes

Beim Recycling von Rotorblättern können theoretisch sowohl die Fasern (Glasfasern, Carbonfasern) als auch die Matrix rezykliert werden. Technisch zielen die meisten Verfahren bisher auf die Rückgewinnung der Fasern ab, unter Zerstörung, Abtrennung oder energetischer Verwertung der Matrix. Im Labor- und Pilotmaßstab thermochemischer Anlagen konnte die Matrix bereits erfolgreich als Pyrolyseöl und damit als Ausgangsstoff für eine Reihe wertvoller Grundchemikalien zurückgewonnen werden. Diese Verfahren sind jedoch weder technisch ausgereift, bspw. hinsichtlich der Ölaufbereitung, noch kommerziell verfügbar. Deshalb entspricht der hier beschriebene Ansatz zur Bewertung des Faserrezyklatwertes dem aktuellen Stand der Technik.

Der Rezyklatwert $R_{Wert\ max}$ [€/kg] beschreibt den monetären Ertrag der aus einem Verkauf von Rezyklatfaser erzielt werden könnte (Hagnell und Åkermo 2019).

$$R_{Wert\ max} = (G_{Wert\ V} \times F_{Zug\ R} \times E) \times \left(\frac{\varrho_r}{\varrho_v}\right)$$

Diese Formel setzt sich aus dem Produkt des marktüblichen Verkaufspreises von Virgin E-Glasfasern $G_{wert\ V}$ sowie der prozentual verbleibenden Zugfestigkeit ($F_{Zug\ R}$) und dem prozentualen verbleibenden E-Modul [E] der rGF zusammen. Als weiterer entscheidender Faktor für den ökonomischen Wert einer recycelten Faser wird die Veränderung der Faserlänge [ρ_r/ ρ_v] berücksichtigt, da sich abhängig vom Recyclingprozess die Faserlänge und damit ein maßgebliches Kriterium der Rezyklatqualität verändert. Dabei gilt der Grundsatz, je länger und gerichteter die Rezyklatfaser, desto höher die Qualität, die mögliche Steifigkeit und der erzielbare Marktpreis. Eine längere und gerichtetere rGF wäre somit besser geeignet für den Einsatz in mechanisch höher beanspruchten Bauteilen und somit als Sekundärrohstoff Teil einer sowohl abfallrechtlich als auch ökonomisch höherwertigen Verwertung. Der beschriebene

Ansatz zur Berechnung des Glasfaser-Rezyklatwertes kann auch zur Berechnung des Carbonfaser-Rezyklatwertes angewendet werden.

Neben den eben genannten Faktoren haben Matrixreste an der Faseroberfläche Einfluss auf die Haftung recycelter Fasern in neuen Verbundstrukturen (Liu et al. 2019). Damit stellen sie einen weiteren Faktor zur Bestimmung der Faserqualität des Rezyklats dar, werden jedoch in der vereinfachten TEA nach Hagnell und Åkermo (2019) nicht mitberücksichtigt.

Abschließend sei zu erwähnen, dass der von Fonte und Xydis (2021) gewählte Ansatz zum Vergleich des theoretischen Reingewinns von EoL-Optionen von GF geprägt ist durch eine Vielzahl von Annahmen und Vereinfachungen wie z. B. dem Weglassen der Kosten der Vorkette. Dennoch ermöglicht dieses Vorgehen trotz einer spärlichen Datengrundlage erste grobe Prognosen zu den Recyclingkosten, Rezyklatwerten und eine erste Indikation des theoretischen Reingewinns (vgl.Tabelle 85).

6.9.5.4 Technoökonomischer Vergleich relevanter Prozessrouten

In diesem Kapitel erfolgt die exemplarische techno-ökonomische Bewertung einer Recyclinganlage zum Glasfaserrecycling aus Rotorblättern nach Fonte und Xydis (2021) basierend auf den folgenden Annahmen (Tabelle 83).

Tabelle 83: Annahmen zu Recyclinganlagen mit jährlichen Rezyklat-Produktionsvolumina von 6000 t.

Parameter	Einheiten	Mechanisches Zerkleinern	Wirbelschicht-verfahren	Pyrolyse
[C_I] Investitionskosten	[€]	390.000	3.000.000	3.000.000
[R_h] Rezyklat pro Stunde	[kg/h]	961	389	519
[$C_{E\ EI}$] Energiekosten Elektrisch [$C_{E\ Gas}$] Energiekosten Gas	[0,1557 €/kwh] [0,0318 €/kwh	-	-	-
[C_P] Personalkosten	[€/h]	35,6	71,2	71,2
[C_W] Wartung	[€]	6 % C_I	6 % C_I	6 % C_I
[C_A] Abschreibung	[€]	10 % C_I	10 % C_I	10 % C_I
[O] Faktor Gemeinkosten	-	25% C_I	25 % C_I	25 % C_I
[S] Faktor für Verwaltung, Forschung, Verkauf und Distribution	-	35 % C_G	35 % C_G	35 % C_G

$C_G = (1+O) * (C_P+C_E+C_W) + C_A$

Quelle: Eigene Darstellung, KIT-IIP, nach Fonte und Xydis (2021).

Der unterschiedliche Wert der Personalkosten bei den Verwertungsverfahren kommt durch die Annahme, dass zum Betrieb der Anlage für das Mechanische Zerkleinern eine Person benötigt wird und bei den Thermochemischen Verfahren zwei Personen.

Um die Erlöse aus dem Verkauf des Rezyklates rGF zu berücksichtigten, verwenden Fonte und Xydis (2021) prozessabhängige und vereinfachte Verlustraten von 32,5 % für Wirbelschichtverfahren, 10 % für das Pyrolyseverfahren und 0 % im mechanischen Recycling. Bei einem angenommenen Gesamtanteil von 60 % Glasfaser im Rotorblatt und einer 5-Tage-Woche im 24h-Schichtbetrieb ergeben sich bei Vollbetrieb der Anlage daraus folgende Werte (Tabelle 84).

Tabelle 84: Übersicht des jährlichen Outputs an Glasfaserrezyklat (rGF).

Prozess	Durchsatz [kg/h]	Jahresstunden [h]	Menge jährliches Rezyklat (R_a) in [t]
Mechanisches Zerkleinern	961	6240	6000
Wirbelschichtverfahren	389	6240	2429
Pyrolyse	519	6240	3240

Quelle: Eigene Darstellung, KIT-IIP, nach Fonte und Xydis (2021).

Neben der produzierten Menge an Rezyklat hat wie bereits beschrieben die Produktqualität einen entscheidenden Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit. In Tabelle 85 ist eine Übersicht der Faktoren zur Berechnung des Rezyklatwertes für die Verfahren mechanisches Zerkleinern, Wirbelschichtverfahren, Pyrolyse und Solvolyse dargestellt.

Tabelle 85: Annahmen zu Rezyklatqualität im Vergleich zur Virgin Glasfaser (vGF).

Annahmen GF-Rezyklat	Mechanisches Zerkleinern (Palmer 2009) (Palmer et al. 2009)	Wirbelschichtverfahren (Pickering et al. 2000)	Pyrolyse (Cunliffe et al. 2003) (Feih et al. 2011)	Solvolyse (Oliveux et al. 2012)
[$F_{Zug\,R}$] Zugfestigkeit [%]	70	50	52	75
[E] E-Modul [%]	90	100	100	k. A.
Faserlänge [mm]	0,1 - 6	5 - 10	10 - 15	k. A.

Quelle: Eigene Darstellung, KIT-IIP, nach Fonte und Xydis (2021).

Die mechanischen Eigenschaften des Glasfaserrezyklates unterscheiden sich je nach verwendetem Recyclingverfahren. So besitzen alle Rezyklate eine im Vergleich zur Virgin Faser reduzierte Monofilament-Zugfestigkeit. Diese beträgt 75 % für chemisch recycelte Rezyklatfasern und 70 % für mechanisch aufbereitete Fasern. Für thermisch durch Wirbelschicht und Pyrolyse recycelte Fasern beträgt die Restzugfestigkeit etwa die Hälfte der von Virgin Glasfasern. Beim E-Modul gibt es deutlich weniger Unterschiede; so besitzt nur das mechanische Zerkleinern einen um 10 % reduzierten Wert im Vergleich zur Virgin Glasfaser (vGF). Bei der Faserlänge gibt es die größten Unterschiede, die den Rezyklatwert nach der Formel (5) von Hagnell und Åkermo (2019) maßgeblich beeinflussen.

Die letzte Komponente zur Bestimmung des Rezyklatwertes ist der Verkaufspreis von vGF. In der nachfolgende Tabelle 86 wird eine Übersicht zu Verkaufspreisen für vGF gezeigt.

Tabelle 86: Annahmen zur Virgin Glasfaser.

Literatur	(Hagnell und Åkermo 2019)	(Vo Dong et al. 2018)	(Cripps 2019)	(Li et al. 2016)
Virgin E-Glasfaser preis [€/kg]	2,5	1 - 3	c. a. 1,2 - 2,2	0,68

Literatur	(Hagnell und Åkermo 2019)	(Vo Dong et al. 2018)	(Cripps 2019)	(Li et al. 2016)
Weitere Angaben	E-Modul 80 GPa Dichte 2700 kg/m^3	keine Hochleistungsglasfaser	E-Glasfaser	k. A.

Quelle: Eigene Darstellung, KIT-IIP, nach Fonte und Xydis (2021).

Zur Berechnung des ökonomischen Wertes von Glasfaserrezyklat verwenden Fonte und Xydis (2021) für den Verkaufspreis von Virgin E-Glasfaser 2 €/kg sowie eine Virgin Glasfaserlänge [ρ_v] von 12 mm. Unter Verwendung der Formeln (1) bis (5) nach Perloff (2018) und Hagnell und Åkermo (2019) zur Berechnung des theoretischen Reingewinns der EoL-Optionen mechanisches Zerkleinern, Wirbelschichtverfahren und Pyrolyse zeigt Tabelle 87 die Ergebnisse bezogen auf 1 kg verwertbaren Rezyklatoutput.

Tabelle 87: Ergebnisse des theoretischen Reingewinns.

	Faserlänge [mm]	Spez. Energie-bedarf [kWh/kg]	$R_{Wert\ max}$ [€/kg]	$R_{Wert\ min,EL}$ [$C_{E,\ El}$ = 0,1557 €/kWh]	$R_{Wert\ min,Gas}$ [$C_{E,\ Gas}$ = 0,0318 €/kWh]	Reingewinn [€/ kg]
Mechanisches Zerkleinern	3	0,044	0,32	0,09	k. A.	0,23
Wirbelschichtverfahren	10	0,17	0,83	0,64	0,61	0,19 - 0,21
Pyrolyse	10	0,17	0,87	0,57	0,54	0,30 - 0,33

Quelle: Eigene Darstellung, KIT-IIP, nach Fonte und Xydis (2021).

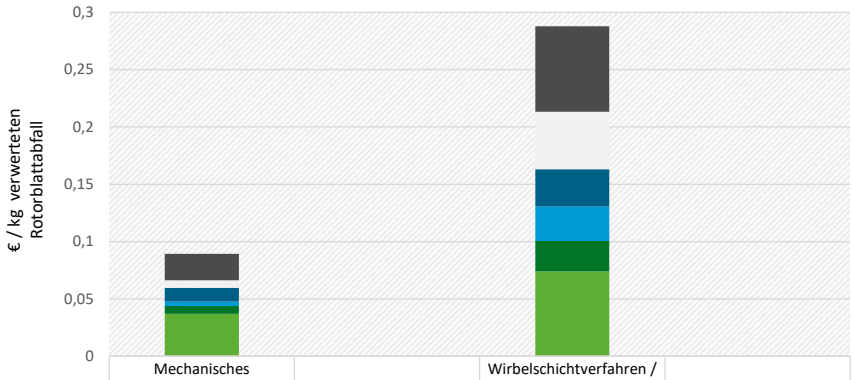
Der um ein vielfaches geringere Rezyklatwert [$R_{Wert\ max}$] des mechanischen Zerkleinerns resultiert aus der geringeren Faserlänge sowie der verringerten Zugfestigkeit und damit Einbußen in der Rezyklatqualität. Demgegenüber steht ein im Vergleich zum irbelschichtverfahren und der Pyrolyse geringerer verfahrenstechnischer Aufwand, was zu deutlich geringeren Herstellungskosten und damit zu einem theoretischen und stark vereinfachten Reingewinn, also der Differenz von $R_{Wert\ max}$ und $R_{Wert\ min}$ von 0,23 €/kg rGF führt. Für die beiden thermischen Verfahren sind die minimalen Werte $R_{Wert\ min}$ und damit die Herstellungskosten eines kg rGF sowohl auf Basis elektrischer Energieversorgung als auch im Fall der Energieversorgung mit Gas angegeben. Die Ergebnisse des Reingewinns liegen für das Wirbelschichtverfahren im Bereich 0,19 bis 0,21€/kg rGF sowie für das Pyrolyseverfahren zwischen 0,30 bis 0,33€/kg rGF je nach Art der Energieversorgung. Nach Auskunft von Branchenkennern zur Verwertung von gemischten Wertstoffabfällen beträgt der Reingewinn des Verwerters bei der EoL Option der Zementklinkerroute etwa 0,02 €/kg (Handelsblatt 2022). Damit könnten die exemplarischen Verwertungsoptionen in der Studie von Fonte et al. (2021) einen um den Faktor 10 bis 15 höheren theoretischen Reingewinn erzeugen.

Bei den thermischen Verfahren ist eine teilweise Rückgewinnung der Matrix als Brennstoff für Eigenprozesswärme in der Kostenkalkulation bereits berücksichtigt. Durch den Vertrieb überschüssiger Abwärme könnten zusätzliche Einnahmen generiert und damit der Reingewinn von thermischen Prozessen weiter erhöht werden. Eine zusätzliche Einnahmequelle bietet die Rückgewinnung von Pyrolyseöl, welches in der technoökonomischen Betrachtung von Fonte et al. (2021) nicht berücksichtigt wurde.

Wenn man nicht den Reingewinn der Herstellung und dem anschließenden theoretischen Verkauf von rGF, sondern nur die Prozesskosten der Verwertung von Rotorblattabfall ohne Vorkette einander gegenüberstellt, dann liegt das mechanische Zerkleinern etwa bei 0,09 €/kg Rotorblattabfall und die beiden thermischen Verwertungen Wirbelschichtverfahren und Pyrolyse bei ca. 0,287 €/kg Rotorblattabfall. Die Kosten der Mitverbrennung im Zementwerk liegen etwa zwischen 0,017 bis 0,02€/kg Rotorblattabfall (Watkins et al. 2012, Handelsblatt 2022), und damit etwa doppelt so hoch wie die Verwertung durch das mechanische Zerkleinern. Die Kosten der thermo-chemischen Verwertung hingegen liegen etwa 30 % über den Kosten der Mitverbrennung im Zementwerk. Die großen Überschneidungen dieser beiden thermischen EoL-Optionen bei den Annahmen zu prozessspezifischen Energieverbräuchen sowie der Investitionsabschätzung spiegeln sich in identischen Prozesskosten der Verwertung eines Kilogramms Rotorblattabfall wider. In den zitieren Studien wird der Verschleiß der Anlagen nicht berücksichtigt, der ggfs. zu höheren Kosten durch Anlagenstillstand, Ersatzteile und Gewinnausfälle führen kann.

Im nachfolgenden Diagramm sind die kumulierten Prozesskosten je verwerteten Kilogramms Rotorblattabfall der drei Recyclingverfahren in einer elektrisch beheizten Anlage mit einer Verwertungskapazität von 6000 Jahrestonnen dargestellt. Absolut gesehen liegen die kumulierten Prozesskosten von den thermischen Verfahren etwa um den Faktor 3 über den Kosten des mechanischen Zerkleinerns. Die ergänzende Datentabelle zeigt die Kostenstruktur sowohl absolut als auch prozentual anteilig aufgeschlüsselt (vgl. Abbildung 189). Man erkennt große Unterschiede sowohl bei den absoluten als auch bei den proportionalen Anteilen der Kostenpositionen Personal, Wartung und Abschreibungen. So fallen die anteiligen Personalkosten mit etwa 25,7 % bei den thermischen Verwertungsverfahren im Vergleich zu 41,4 % beim mechanischen Verwerten deutlich geringer aus. Hingegen sind die absoluten Anteile der Wartungskosten und der Abschreibungen bei den thermo-chemschen Verfahren etwa 7,5 mal so hoch wie die des mechanischen Verfahrens. Auch prozentual betrachtet betragen die Anteile der Wartungskosten und Abschreibungen bei thermischen Verfahren mit 10,4 % und 17,4 % im Vergleich zur mechanischen Verwertung mit 4,4 % und 7,3 % einen etwa doppelt so großen Wert.

Abbildung 189: Kumulierte Prozesskosten pro kg Rotorblattabfall (bei 6000 t Jahreskapazität einer elektrisch beheizten Anlage, ohne Vorkette).



	Mechanisches Zerkleinern		Wirbelschichtverfahren / Pyrolyse	
Verwaltung,Forschung, Verkauf und Distribution	0,023176	25,9 %	0,074601	25,9 %
Abschreibung	0,006500	7,3 %	0,050000	17,4 %
Gemeinkosten	0,011944	13,4%	0,032629	11,3%
Wartungskosten	0,003900	4,4%	0,030000	10,4%
Stromkosten	0,006851	7,7%	0,026469	9,2%
Personalkosten	0,037024	41,4%	0,074048	25,7%

Quelle: Eigene Darstellung, KIT-IIP, nach Fonte und Xydis (2021).

Wie eingangs geschrieben sind in dem vereinfachten Ansatz nach Fonte und Xydis (2021) die Kosten aus der Vorkette, also der Demontage vor Ort, der Vorzerkleinerung sowie der Transport, nicht enthalten. Die Gesamtkosten der Vorzerkleinerung von einem ganzen Rotorblatt zu 1 bis 3 cm großen Stücken sind in der Literatur mit 90 bis 120 $/t angegeben (EPRI 2018; Cooperman et al. 2021). Die Kosten für den Transport sind stark von der Art des Transportgutes und der zurückgelegten Strecke abhängig und liegen für zerkleinertes Material (1-3 cm) etwa bei 0,05 bis 0,07 € pro Tonnenkilometer bzw. für größere Stücke < 8m bei 0,25 € pro Tonnenkilometer (Westbomke 2021; Cooperman et al. 2021). Nach Angaben der Firma Neocomp GmbH betrugen die Annahmegebühren zur Verwertung von Rotorblattabfall etwa 120 bis 150 €/t (Landesamt für Umweltschutz Sachsen Anhalt 2018) und sind mit den Kosten der gesamten Vorkette gleichzusetzen. Gewöhnlich werden bei Vergleichen unterschiedlicher EoL-Optionen von FKV die Vorketten in der bilanziellen Betrachtung nicht mitberücksichtigt, da angenommen wird, dass die Vorkette jeweils identisch ist und somit bei einem Vergleich der EoL-Optionen vernachlässigt werden kann.

Um die tatsächlichen Kosten der gesamten Prozesskette von der Demontage bis zum Sekundärrohstoff aus Rotorblattabfall berechnen zu können, müssten vollständige Prozessketten detailliert definiert, die Energie- und Stoffbilanzen verfügbar sein und in jedem Schritt die prozessspezifischen Kosten berechnet werden. Aufgrund der Vielzahl an möglichen Prozessketten und prozessbedingten Kostenfaktoren ist es daher schwierig und aufwändig, exakte Bereiche für die Gesamtkosten der teils ganz unterschiedlichen Prozessketten anzugeben. Gleiches gilt für die Bestimmung der Faserrezyklat- und Matrixrezyklatwerte. Diese sind sowohl von der Existenz eines Marktes für glas- und carbonfaserhaltige Sekundärrohstoffe sowie von einer Vielzahl unterschiedlicher Prozess- und Produkteigenschaften entlang der Prozesskette abhängig. Hinzu kommen die grundätzlichen Unsicherheiten, die bei der Bewertung eines Prozesses im vorindustriellen Reifegrad vorherrschen.

Dennoch stellt der vereinfachte und exemplarische Ansatz nach Fonte und Xydis (2021) eine erste gute Möglichkeit dar, unterschiedliche EoL-Prozesse von faserhaltigen Kunststoffen und zugehöriger Recyclingprodukte technoökonisch miteinander zu vergleichen. Dabei liegt trotz deutlich höherer Energiekosten der höchste theoretische Reingewinn beim Pyrolyseverfahren mit ca. 0,30 €/kg rGF. Dieser liegt etwa um ein Drittel über den Reingewinn des mechanischen Zerkleinerns mit etwa 0,23€/kg rGF. Den geringsten Reingewinn erzielt das Wirbelschichtverfahren mit etwa 0,19€/kg rGF und liegt damit etwa im Bereich der Mitverbrennung im Zementwerk. Grund dafür ist unter anderem die Annahme eines relativ großen verfahrenstechnischen Aufwandes beim Wirbelschichtverfahren und eines vergleichsweise geringeren Rezyklatwertes aus der mechanischen Zerkleinerung bedingt durch eine stärkere Einkürzung der rGF.

6.9.6 Zusammenfassung zur Verwertung von Faserverbundwerkstoffen

Die Verwertung aufbereiteter Rotorblattabfälle soll für alle enthaltenen Materialien hochwertig erfolgen, wobei duroplastische Kunststoffe (GFK, CFK, Schäume, Lacke) einen maßgeblichen Mengenanteil bei diesem Abfallstrom besitzen. Diese Materialien sind der Gruppe an Reaktionspolymeren zuzuordnen, die ähnliche Eigenschaften und ein vergleichbares Verhalten in thermochemischen, chemischen als auch physikalischen (Lösemittelverfahren) Recyclingprozessen besitzen. Beim lösemittelbasierten Prozess wird das Polymer zurückgewonnen und das Verfahren dem physikalischen Recycling zugeordnet.

Zur Gruppe der Reaktionspolymere gehören neben Epoxiden auch ungesättigte Polyester, Phenole sowie verschiedene Polyurethane, wobei die Matrizes der FVW (GFK / CFK) häufig aus Epoxidharzen bestehen. Lacke und Beschichtungen sind meist Zweikomponentensysteme auf

Polyurethan-Basis, wobei Polyurethane überwiegend duroplastische Polymere sind, die bei Erhitzung nicht schmelzen.

Duroplaste, auch als Duromere bezeichnet, umfassen Kunststoffe, die durch chemische Reaktion, meist mittels Polykondensation, vernetzen und ein räumlich engmaschiges Gitter aus Makromolekülen bilden, was für deren hohe mechanische Festigkeit sorgt.

Bei der thermischen Zersetzung (z. B. Pyrolyse) von Duromeren zerfallen die Polymere nicht bis zum Monomer, sondern bilden beim Zerfall Polymerbruchstücke. Epoxidharze tragen Sauerstoff im Polymergerüst, der bei der Pyrolyse in das Pyrolyseöl übergeht und dessen Qualität negativ beeinflussen kann, sodass eine Aufbereitung vor der weiteren Nutzung notwendig wird. Bei der Pyrolyse von PU-Schäumen wird CO_2 freigesetzt und die Bauteile können klebrige Oberflächen bilden, was Probleme im Pyrolysereaktor verursachen kann. Pyrolysereaktoren sind so auszulegen, dass ein optimaler Energie- und Stofftransport gewährleistet werden kann, was zu einer Vielzahl unterschiedlicher Designs führen kann.

Allgemein kann davon ausgegangen werden, dass die Pyrolyse von Duroplasten eine größere Herausforderung darstellt als diejenige von Thermoplasten. Eine Übertragung von Pyrolysereaktoren, die sich für Thermoplaste oder andere Materialien wie Altreifen bewährt haben, ist nicht zwangsläufig auf die Pyrolyse von duroplastischen FVW übertragbar.

Kommerziell etablierte Pyrolyseprozesse für FVW werden zu Inertisierung allgemein mit Stickstoff betrieben. Die Pyrolysezone muss beheizt und das aufbereitete Material über Fördereinrichtung möglichst kontinuierlich aufgegeben werden. Solche Pyrolyseanlagen sind kommerziell realisiert, zum Beispiel von Mitsubishi Chemical Advanced Materials in Stade oder ELG in England, wobei das Pyrolysegas energetisch für die Beheizung des Reaktors genutzt, und hierzu in einer Brennkammer verbrannt wird. Für Gewinnung reiner rCF bei der CFK-Pyrolyse wird hochreiner Stickstoff für die Inertisierung benötigt, und die bei der Verbrennung des Pyrolysegases erzeugte Wärmeenergie wird mittels Wärmetauscher übertragen.

6.10 Zusammenfassung zur Verwertung aufbereiteter Rotorblattabfälle

Die Verwertung von FVW kann mittels Recyclingprozessen, Prozessen der sonstigen Verwertung und Verfahren des Co-Processing erfolgen.

Recyclingprozesse unterteilen sich in physikalische, thermochemische und chemische Verfahren, wobei zu den physikalischen Prozessen die mechanische Zerkleinerung (Partikelrecycling), Lösungsverfahren mit Erhalt des Polymers, und die HV-Fragmentierung zählen.

Bei den thermochemischen Prozessen sind insbesondere die Pyrolyse und Vergasung zu benennen. Bezüglich des Wirbelschichtverfahrens liegen unzureichende Informationen zur Luftzahl vor, was eine Zuordnung des Prozesses erschwert. Bei der MW-Pyrolyse, einer Untergruppe der Pyrolyse, sollen sowohl die Fasern, als auch die Matrix recycelt werden. Kommerziell realisierte Pyrolyseanlagen für FVW nutzen meist das Pyrolysegas der Matrixzersetzung zur Beheizung des Pyrolysereaktors. Eine stoffliche Verwertung der Matrix ist möglich, jedoch befinden sich diese Prozesse für FVW noch in der Entwicklungsphase mit TRL 5. Hier zu nennen ist zum Beispiel die iCycle–Technologie von Fraunhofer Umsicht, wo Faser und Matrix recycelt werden sollen. Eine Übertragung bewährter Pyrolysetechniken aus anderen Anwendungsbereichen, wie zum Beispiel der Altreifenpyrolyse, sollte beachtet werden, da bei solchen Prozessen teils das Pyrolysegas in einem Gasmotor zum Betrieb des Prozesses verwertet und das Pyrolyseöl vermarktet wird. Die MW-Pyrolyse besitzt einen geringen TRL und

damit gewonnene rCF zeigen eine Reduzierung der Materialeigenschaften im Vergleich zu Neufasern. Ein Forschungs- und Entwicklungsbedarf wird bei den Pyrolyseprozessen gesehen.

Beim chemischen Recycling handelt es sich maßgeblich um die Solvolyse in ihren unterschiedlichen Ausführungen, die sich noch in der Entwicklungsphase befinden und in der Literatur ein TRL von maximal 5 angegeben wird. Es gibt mehrere Unternehmen, die die Solvolyse industrialisieren wollen und einen Markteintritt planen, wobei die Solvolyse im Vergleich zu den anderen Verfahren den mit Abstand höchsten Energiebedarf benötigt, aber die Weiterverwendung der Matrix ermöglicht.

Neben den Recyclingprozessen für FVW sind auch Verfahren des Co-Processing zu berücksichtigen. Hiebei zu nennen sind die Verwertung von Rotorblattabfällen im Zementwerk, in metallurgischen Prozessen und in Prozessen der chemischen Industrie, wie zum Beispiel in der Carbid-Produktion.

Bei der Verwertung von Rotorblattabfällen in der Zementroute können über 80 % der Rotorblattmasse eingesetzt werden, wobei die GF rohstofflich im Klinker und die anderen Materialien, wie Matrix, Balsaholz und Schäume, energetisch verwertet werden.

Die CFK-Verwertung in der Carbidroute besitzt TRL 7 bis 8, wobei es zum diesem Prozess noch einige offene Fragen gibt, wie z. B. die notwendige CFK-Aufbereitung und Dosierung sowie eine mögliche Qualitätsbeeinflussung der Haupt- und Nebenprodukte.

Die Verwertung von GFK bzw. CFK in metallurgischen Prozessen befindet sich am Anfang der Entwicklung, wobeil solche Prozesse das Potential der Verwertung großer Abfallmengen besitzen.

Sonstige in Rotorblattabfällen enthaltene Materialien sind mit unterschiedlicher Qualität verwertbar. Für Metalle gibt es etablierte Prozesse mit sehr hohen Recyclingstandards, sodass hier kein Handlungs-, Forschungs- oder Entwicklungsbedarf gesehen wird.

Eine Verwertung von Schäumen, kann je nach Schaumart mittels Pyrolyse oder Solvolyse erfolgen, wobei viele der Schäume den Reaktionspolymeren zuzuordnen sind, die sortenrein für eine Pyrolyse vorliegen müssen. Schäume könne auch mittels Lösungsverfahren recycelt werden, wie mittels des CreaSolv Prozess von Fraunhofer IVV der mit TRL 6 bewertet wird.

Bezüglich der Verwertung von Balsaholz gibt es Ansätze dieses Material in Produkte zu überführen, was eine möglichst sortenreine Aufbereitung bedingt, wobei solche Prozesse bisher nicht am Markt etabliert sind.

Als kommerziell etablierte Prozesskette ist die Zementroute für GFK und die Pyrolyse für CFK zu nennen, aber auch das sogenannte Partikelrecycling ist für GFK und CFK vorstellbar. Mit dem ERCOM-Prozess gab es früher ein Verfahren zur GFK-Verwertung, das einige Jahre betrieben wurde, sich aber langfristig nicht am Markt etablieren konnte.

Der maßgebliche Anteil von Rotorblattabfällen besteht mit etwa 80 % aus GFK, das bisher kommerziell nur über die Zementroute bei entsprechender Aufbereitung verwertet werden kann. Diese Verwertung erfolgt aktuell in Deutschland nur im Zementwerk Lägerdorf der Firma Holcim. Dessen GFK-Kapazität liegt bei maximal 40.000 t/a. Da beim Rückbau von WEA etwa 30.000 t/a an Rotorblattabfällen anfallen, wäre deren Verwertung über die Zementroute gesichert. Die Produktion an glasfaserhaltigen FVW liegt in Deutschland bei etwa 440.000 t/a und im LAGA-Abschlussbericht zur Entsorgung faserförmiger Abfälle wird die Bereitstellung weiterer Verwertungsverfahren angesprochen.

Kommerziell etabliert war das mechanische Recycling (Partikelrecycling) von GFK, das von der Firma ERCOM betrieben wurde, sich aber am Markt nicht langfristig etablieren konnte. Mittels

Partikelrecycling können FVW rein mechanisch aufgetrennt werden, um eine faserreiche und eine partikelreiche Fraktion zu erzeugen, wobei die faserreiche Fraktion als Verstärkungsfasern in SMC-Produkten Verwendung finden könnten. Um eine Faser- / Matrixtrennung zu erhalten, muss der vorzerkleinerte FVW auf etwa 100 µm aufgemahlen werden, um eine Trennung zu gewährleisten, was technisch mittels Hammermühlen erfolgen kann. Kommerziell wurde neben ERCOM dieser Prozess auch von Phonix Fiber in Kanada betrieben. Ein ähnlicher Prozess wird an der TU Freiberg als Weiterentwicklung des ERCOM-Prozesses mit nasser Feinmahlung und Klassierung untersucht. Beim Partikelrecycling werden die im FVW enthaltenen Fasern durch die massive mechanische Beanspruchung erheblich verkürzt, sodass Kurzfasern entstehen, die nur in entsprechenden Produkten verwertbar sind.

Aktuell erfolgt die Verwertung von GFK-Abfällen von Rotorblättern in größeren Mengen ausschließlich im Zementwerk, wobei in Deutschland nur das Zementwerk Lägerdorf der Firma Holcim GFK-Abfälle annimmt (maximal 40.000 t/a).

Zur Verwertung von GFK-Abfällen sind im LAGA-Abschlussbericht (Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) 2019) etliche Empfehlungen enthalten, wie zum Beispiel, dass weitere Prozesse als notwendig erachtet werden. Empfohlen wird eine „Erforschung, Entwicklung und Etablierung technischer Verfahren zur Verwertung von GFK-Abfällen (z. B. Pyrolyse, Solvolyse) als Alternative zur Verwertung in Zementwerken“.

Weitere Empfehlungen des LAGA-Abschlussbereichts bezüglich glasfaserhaltiger Abfallesträme sind:

- Beauftragung von Forschungsvorhaben zu Gesundheitsgefahren von Glasfaserstäuben und deren Freisetzungsverhalten
- Ermittlung des aktuellen Standes zur Entsorgung von Glasfaserabfällen
- Forschungsbedarf zu technischen Verwertungsverfahren von glasfaserhaltigen Abfällen
- Getrennthaltung und separate Erfassung
- Kennzeichnung von GFK-Produkten
- Festlegung separater Abfallschlüssel.

Bezüglich des Umgangs und der Verwertung von CFK-Abfällen sind im LAGA-Abschlussbericht folgende allgemeine Bemerkungen enthalten:

- Bis zur Schaffung und Etablierung geeigneter sowie ausreichender Verwertungswege sollten CFK-Abfälle, die nicht verwertet werden können, ohne Vorbehandlung als Monofraktion gelagert werden.
- Sofern die angestrebte Verwertung von CFK-Abfällen nach einer Lagerdauer von max. 3 Jahren nicht durchführbar ist, müssen die Abfälle nach einer geeigneten Vorbehandlung (z. B. Pyrolyse) ordnungsgemäß und schadlos beseitigt werden.
- Lagerung von Produktions- und End-of-Life-Abfällen aus dem Gewerbe erfolgt in der Verantwortung der Hersteller.
- Vermeidung einer Verbrennung von CFK-Abfällen (Monofraktionen) in Hausmüllverbrennungsanlagen und Sonderabfallverbrennungsanlagen.

- Der LAGA-Ad-hoc-Ausschuss spricht sich dafür aus, bei der Lagerung von carbonfaserhaltigen Abfällen eine Sicherheitsleistung in Höhe von 1.000 €/Mg festzulegen.

Weiter Empfehlungen zum Umgang und Verwertung carbonfaserhaltiger Abfälle:

- Beauftragung von Forschungsvorhaben zu Gesundheitsgefahren von Carbonfaserstäuben und deren Freisetzungsverhalten
- Ermittlung des aktuellen Standes zur Entsorgung von carbonfaserhaltigen Abfällen
- Forschungsbedarf zu technischen Verwertungsverfahren von carbonfaserhaltigen Abfällen
- Getrennthaltung und separate Erfassung
- Kennzeichnung von CF-Produkten
- Sicherung einer hochwertigen Kreislaufführung
- Festlegung separater Abfallschlüssel
- Lagerung separat erfasster CFK-Abfälle bis zur Entsorgung (Interimslösung)
- Umgang mit Stäuben bei der Bearbeitung von carbonfaserhaltigen Stoffen.

7 Organisationsverantwortung

7.1 Überblick

Im Folgenden werden die Organisationsverantwortung für die Entsorgung der Rotorblattabfälle und rechtliche Möglichkeiten für die Umsetzung der sich aus den Kapiteln 2 bis 6 ergebenden technischen Empfehlungen erörtert. Es wird geklärt, welcher Verantwortung Betreiber der WEA im Rahmen ihrer Rückbauverpflichtung für die Entsorgung der Rotorblätter gerecht werden müssen, ob und ggfs. welche Aufgaben des Rückbaus und der Aufbereitung der Rotorblätter Aufbereitungsbetrieben zugewiesen werden sollten, ob eine spezielle Sachkunde nachgewiesen werden muss und nicht zuletzt, ob und inwieweit es sinnvoll ist, das in den §§ 23 ff. KrWG vorgesehene Instrumentarium der Produktverantwortung (Anforderungen an Produktgestaltung, Produktverantwortung für die Entsorgung, gesonderte Rücknahme bzw. Rückgabe, ggfs. im Rahmen einer Branchenlösung, und Kennzeichnungs- bzw. Produktinformationspflichten) auf der Grundlage einer entsprechenden Verordnung einzusetzen.

Fragen zur Konkretisierung der Organisationsverantwortung beschränken sich nicht auf Umfang und Art und Weise der Zuweisung einer Organisationsverantwortung für den Rückbau, die Aufbereitung und Verwertung der Rotorblätter; sie erstrecken sich vielmehr auch auf materiell-rechtliche Anforderungen des Umweltrechts an eine Aufbereitung der Rotorblätter, mit Blick auf den Ort der Aufbereitung bzw. des Rückbaus, auf den zu definierenden Stand der Technik der Aufbereitungstechnik (Grenzwerte, Recycling-Ziele, Getrenntsammlung) und mit Blick auf die gebotene behördliche oder innerbetriebliche Überwachung bzw. das Monitoring des Verwertungsprozesses.

Geprüft werden dazu Empfehlungen, ergänzende verfahrenstechnische und/oder materiell-inhaltliche Anforderungen speziell an das Recycling von Rotorblättern zu richten. Außerdem soll hinterfragt werden, ob und inwieweit einzelstaatliche Vorgaben ergänzend zu EU-weit geltenden Anforderungen an die Verwertung von Rotorblättern zu richten und inwieweit stoffbezogen individuelle Regelungen zu Rotorblättern oder übergreifend zu stoffgleichen Fraktionen unterschiedlicher Herkunft sinnvoll sind.

Der vom Umweltbundesamt herausgegebene Abschlussbericht 117/2019 zur Entwicklung eines Konzepts für einen ressourcenschonenden Rückbau von WEA plädiert dafür, Probleme der Entsorgung von Stoffströmen aus WEA, die nach der Aufbereitung gleichwertig zu Stoffströmen anderen Ursprungs sind, nicht in spezifischen Leitlinien oder gesetzlichen Vorgaben für WEA zu regeln (Zotz et al. 2019, Bl. 33 der Zusammenfassung). Diese Einschätzung wird berücksichtigt und auf der Grundlage der wissenschaftlich-technischen Ergebnisse dieses Forschungsvorhabens hinterfragt.

Die nachfolgenden Ausführungen bauen auf Erkenntnissen und Empfehlungen des erwähnten Abschlussberichts zur Entwicklung eines Konzepts für einen ressourcenschonenden Rückbau von WEA auf. Einleitend wird auf der Grundlage der Erkenntnisse aus jenem Abschlussbericht und der Ergebnisse zu den Kapiteln 2 bis 6 dieses Forschungsberichtsvorhabens erläutert, welche rechtlichen Anforderungen nach dem geltenden Recht an die Entsorgung von Rotorblattabfällen zu stellen sind; danach wird erörtert, ob und inwieweit es Anlass gibt, rechtliche Rahmenbedingungen zu verändern, zu ergänzen oder untergesetzlich zu

konkretisieren und ggfs. auf welchem Weg solche Änderungen oder Konkretisierungen sinnvoll sind (z. B. als normkonkretisierende VV bzw. Technische Anleitung, Merkblatt/Vollzugshinweise, Verordnung zu Pflichten der Kreislaufwirtschaft (§§ 8, 10 KrWG) oder zur Produktverantwortung (§§ 24, 25 KrWG). Dies hängt u. a. davon ab, ob die Umsetzung technischer Empfehlungen aus den Kapiteln 2 bis 6 unmittelbar verbindliche, auch für Gerichte maßgebliche Gebots- oder Verbotsvorgaben für die Entsorgungspflichtigen erforderlich machen und ob und inwieweit sich die technische Entwicklung des Rückbaus und des Recyclings von Rotorblättern noch in einem Fluss befindet bzw. zukünftig noch befinden wird, der eine Aktualisierung in kürzeren Intervallen nahelegt, was unter Inkaufnahme einer allenfalls behördenverbindlichen, nicht jedoch unmittelbaren Verbindlichkeit für Unternehmen und Gerichte eher für die Statuierung eines Technikstandards durch Technische Regeln, Richtlinien oder auch nur für Handlungsempfehlungen und behördliche Vollzugshinweise sprechen könnte. Für das Letztere plädiert der Abschlussbericht zur Entwicklung eines Konzepts für einen ressourcensichernden Rückbau von WEA (Zotz et al. 2019).

Bei der rechtlichen Ausgestaltung der Organisationsverantwortung geht es auch um eine mögliche Veränderung (Verschärfung) materiell-rechtlicher Maßstäbe für das Recycling, um die Beschreibung, rechtliche Bewertung und ggfs. auch verbindliche Festlegung von Entsorgungswegen, um zusätzliche Anforderungen an die behördliche und/oder die Fremd- oder Eigenüberwachung sowie um eine mögliche Zuweisung einer Entsorgungsverantwortung für Hersteller und Vertreiber von WEA bzw. von Rotorblättern, wobei für eine solche Produktverantwortung unterschiedliche Regelungsmodelle denkbar und vor allem auch mit Blick auf den zu beachtenden Verhältnismäßigkeitsgrundsatz zu erörtern sind. Dabei wird unter anderem auch eine von der Organisationsverantwortung für Hersteller/Vertreiber abweichende Kostenzurechnung geprüft, insbesondere ob eine Rücknahme der Rotorblattabfälle für den Anlagenbetreiber kostenlos sein sollte oder ob ihm die Kosten der Entsorgung durch den rücknahmepflichtigen Hersteller ganz oder teilweise auferlegt werden können bzw. sollten. Nicht zuletzt wird erörtert, ob und inwieweit Anforderungen an die Produktinformation und Produktgestaltung ergänzend zu regeln sind.

Zusätzlich zu diesen technischen Aspekten des Rückbaus kann sich weiterer Handlungsbedarf aufgrund der Befürchtung ergeben, dass sich mittelfristig Finanzierungslücken zwischen den gebildeten Sicherheitsleistungen der WEA-Betreiber, ihren finanziellen Leistungsfähigkeiten und den zukünftig zu erwartenden Entsorgungskosten auftun. Der zum Rückbau der WEA und zur Verwertung der Rotorblattabfälle verpflichtete Betreiber muss den Rückbau und die Entsorgung zwar auch dann finanzieren, wenn deren Kosten die Höhe der von ihm erbrachten Sicherheitsleistung und der von ihm dafür gebildeten Rückstellung übersteigen. In Einzelfällen einer unbekannten Größenordnung könnten Anlagenbetreiber damit in der Zukunft jedoch überfordert sein. Das Umweltbundesamt hat dazu ein spezielles Forschungsvorhaben „Entwicklung eines Konzepts und Maßnahmen zur Sicherung einer guten Praxis bei Rückbau und Recycling von WEA“ (FKZ 3721 34 301 0) bei Ernst & Young und der Technischen Universität Dortmund in Auftrag gegeben. Dort sollen unter anderem Berechnungsformeln für Rückstellungsleistungen entwickelt bzw. weiterentwickelt und harmonisiert werden.

Im Kapitel 7 wird in diesem Zusammenhang erörtert, ob und inwieweit Hersteller und Vertreiber von WEA und/oder Rotorblättern auf der Grundlage des durch die Rechtsprechung sehr weit gefassten Begriffs des Abfallerzeugers und dessen Entsorgungsverantwortung nach §

7 Abs. 2 S. 1 KrWG in die Entsorgungsverantwortung genommen werden können oder ob dazu eine (zusätzliche) Verordnung, gestützt auf § 24KrWG, zu empfehlen ist.

Zu bedenken sind dabei insbesondere auch die Schnittstellen bei der Entsorgung von Rotorblättern. Einerseits besteht eine umfassende Nachsorgeverantwortung des Betreibers einer WEA nicht nur für die Entsorgung der Rotorblätter, sondern für die WEA insgesamt. Es muss deshalb hinterfragt werden, ob und inwieweit spezifische Verantwortlichkeiten in organisatorischer und/finanzieller Hinsicht für die Entsorgung der Rotorblätter abweichend von bzw. ergänzend zu der Entsorgungsverantwortung des Anlagenbetreibers für die Entsorgung der im Zusammenhang mit der Stilllegung seiner WEA entstehenden Abfälle begründet werden sollen. Hinzu kommt, dass die zentralen Fragen nach einer ordnungsgemäßen und schadlosen Entsorgung der glasfaser- und carbonfaserhaltigen Abfälle keineswegs nur Rotorblätter von WEA betreffen. Denn auch weitere Teile der WEA, etwa die Gondel, können solche Fasern enthalten und dementsprechend vergleichbare Entsorgungsprobleme verursachen. Nicht zuletzt werden GFK- und CFK-Fasern nicht nur in WEA, sondern in zahlreichen anderen Erzeugnissen verwendet. Im Abschlussbericht des Forschungsvorhabens „Möglichkeiten und Grenzen der Entsorgung carbonfaserverstärkter Kunststoffabfälle in thermischen Prozessen“, im Auftrage des Umweltbundesamts, 2019 (Quicker et al. 2021), wird erläutert, dass der Leichtbau unter Verwendung von carbonfaserverstärkten Verbundwerkstoffen seit Jahren kontinuierlich zunimmt; eingesetzt werden solche Materialien vor allem im Bereich der Luft- und Raumfahrt, im Bereich Mobilität und Transport, insbesondere im Automobilbau (z. B. Karosserien von Elektroautos), im Sportbereich (z. B. Fahrradrahmen) und nicht zuletzt auch in WEA (Quicker et al. 2021). Glasfaserverstärkte Kunststoffe werden ebenfalls nicht nur in WEA, sondern z. B. auch im Schiffs- und Anlagenbau eingesetzt. Es stellt sich deshalb die Frage, ob und inwieweit spezifische Vorgaben für eine Organisationsverantwortung für Rotorblätter von WEA oder allgemeiner für faserhaltige Abfälle formuliert werden sollten (siehe dazu z. B. auch die Vollzugshinweise des Landesverwaltungsamts Sachsen-Anhalt, Stand 10/2020, für die „Entsorgung von carbon- und glasfaserhaltigen Abfällen“ (Ministerium für Bau und Verkehr des Landes Sachsen–Anhalt 2005) sowie den Abschlussbericht „Entsorgung faserhaltiger Abfälle“ des LAGA-Ad-hoc-Ausschusses mit Stand 7/2019 (Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) 2019)).

7.2 Pflichten zur Entsorgung von Rotorblättern

Zur Klärung der Frage, ob die materiell-rechtlichen Anforderungen an eine hochwertige, schadlose und ordnungsgemäße Verwertung von Rotorblattabfällen derzeit hinreichend erfüllt werden können, ob und inwieweit Defizite der Entsorgungsinfrastruktur (insbesondere bei der Aufbereitung der Rotorblätter) zu beklagen sind und ob es Bedarf für eine untergesetzliche Normkonkretisierung gibt, sollen zunächst die rechtlichen Rahmenbedingungen hierfür erläutert werden.

Die maßgeblichen rechtlichen Anforderungen an die Entsorgung von Rotorblattabfällen ergeben sich für immissionsschutzrechtlich genehmigte WEA aus § 5 Abs. 3 Nr. 2 BImSchG und darüber hinaus aus dem KrWG. Nach § 5 Abs. 3 Nr. 2 BImSchG sind genehmigungsbedürftige Anlagen so zu errichten, zu betreiben und stillzulegen, dass auch nach einer Betriebseinstellung vorhandene Abfälle ordnungsgemäß und schadlos verwertet oder ohne Beeinträchtigung des Wohls der Allgemeinheit beseitigt werden. Nach § 7 Abs. 2 S. 1 KrWG sind die Erzeuger und Besitzer von Abfällen zur Verwertung ihrer Abfälle verpflichtet. Die Verwertung von Abfällen hat nach § 7

Abs. 2 S. 21 KrWG Vorrang vor deren Beseitigung. Der Vorrang entfällt nach § 7 Abs. 2 S. 3 KrWG, wenn die Beseitigung der Abfälle den Schutz von Mensch und Umwelt nach § 6 Abs. 2 S. 2 und 3 KrWG am besten gewährleistet. Nach § 15 Abs. 1 S. 1 KrWG sind die Erzeuger oder Besitzer von Abfällen, die nicht verwertet werden, verpflichtet, diese zu beseitigen, soweit in § 17 KrWG nichts anderes bestimmt ist, d. h. eine Überlassungspflicht geregelt ist.

7.2.1 Beginn und Dauer der Entsorgungspflicht nach Stilllegung der WEA

7.2.1.1 Beginn der Entsorgungspflicht

WEA werden zumeist für eine unbestimmte Betriebsdauer unbefristet immissionsschutzrechtlich oder baurechtlich genehmigt; kleinere Anlagen können aufgrund einer Anzeige ebenfalls grundsätzlich unbefristet betrieben werden. Nur auf besonderen Antrag des Vorhabenträgers kann die immissionsschutzrechtliche Genehmigung für größere WEA nach § 12 Abs. 2 S. 1 BImSchG ausnahmsweise befristet erteilt werden. Ein solcher Antrag des Betreibers einer WEA kann im Einzelfall sinnvoll sein, wenn damit gerechnet werden kann, dass bei einer Befristung weniger Einwendungen zu erwarten sind oder wenn sich herausstellen sollte, dass die WEA erst durch eine Befristung genehmigungsfähig wird (Jarass 2020) , § 12 Rn. 38).

Die grundsätzlich unbefristete Zulassung der Anlagen ändert jedoch nichts daran, dass die Betriebsdauer solcher Anlagen endlich ist. Sie wird zumeist derzeit auf etwa 20 – 25 Jahre prognostiziert; statistisch liegt sie aktuell möglicherweise etwas darunter. Nach dem Ende der Betriebszeit können die Anlagen häufig nicht mehr genutzt bzw. wiederverwendet werden. Allerdings kann auf der Grundlage einer entsprechenden Begutachtung insbesondere zur Standsicherheit der Betrieb einer WEA über einen längeren Zeitraum noch fortgesetzt werden, sodass sich die Betriebsdauer im Einzelfall über die regelmäßige Betriebsdauerzeit hinaus auch um einige Jahre verlängern kann (Dix 2020).

Hinzu kommt, dass der Gesetzgeber im Rahmen der Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) 21.07.2014-Novelle 2021 in § 3 Nr. 3a Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) 21.07.2014 für Anlagen, die vor dem 01.01.2021 in Betrieb genommen wurden und deren Anspruch auf Zahlung einer Vergütung nach der für die Anlage maßgeblichen Fassung des EEG beendet ist, den Begriff „ausgeförderte Anlagen“ eingeführt hat und für diese Anlagen übergangsweise eine neue Einspeisevergütung (§ 21 Abs. 1, § 100 Abs. 5 Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) 21.07.2014) vorsieht. Damit kann die Fortsetzung des Anlagenbetriebs auch nach dem Ende der bisherigen Vergütung auch unter Berücksichtigung späterer Nachsorgekosten wirtschaftlich bleiben.

Die Notwendigkeit, Rotorblattabfälle von WEA zu entsorgen, d. h. vorrangig zu verwerten oder nachrangig zu beseitigen, entsteht erst zu dem Zeitpunkt, zu dem die Rotorblätter Abfall werden. Das ist der Fall, wenn sich ihr Besitzer nach § 3 Abs. 1 S. 1 KrWG der Rotorblätter entledigt, entledigen will oder entledigen muss. Angefallen sind nach der Rechtsprechung Abfälle, wenn die Merkmale des Abfallbegriffs des § 3 Abs. 1 KrWG erstmalig erfüllt sind (BVerwG, Urt. v. 13. 12. 2007 – 7 C 42/07, juris Rn. 11).

Eine Entledigung im Sinne von § 3 Abs. 1 S. 1 KrWG ist nach § 3 Abs. 2 KrWG anzunehmen, wenn der Besitzer Stoffe oder Gegenstände einer Verwertung im Sinne der Anl. 2 des KrWG oder einer

Beseitigung im Sinne der Anl. 1 des KrWG zuführt oder die tatsächliche Sachherrschaft über sie unter Wegfall jeder weiteren Zweckbestimmung aufgibt.

Der Wille zur Entledigung im Sinne von § 3 Abs. 1 S. 1 KrWG ist nach § 3 Abs. 3 S. 1 KrWG hinsichtlich solcher Stoffe oder Gegenstände anzunehmen, die bei der Energieumwandlung, Herstellung, Behandlung oder Nutzung von Stoffen oder Erzeugnissen oder bei Dienstleistungen anfallen, ohne dass der Zweck der jeweiligen Handlung hierauf gerichtet ist, oder deren ursprüngliche Zweckbestimmung entfällt oder aufgegeben wird, ohne dass ein neuer Verwendungszweck unmittelbar an deren Stelle tritt.

Der Besitzer muss sich der Stoffe oder Gegenstände nach § 3 Abs. 4 S. 1 KrWG entledigen, wenn diese nicht mehr entsprechend ihrer ursprünglichen Zweckbestimmung verwendet werden, aufgrund ihres konkreten Zustands geeignet sind, gegenwärtig oder künftig das Wohl der Allgemeinheit, insbesondere die Umwelt, zu gefährdenund deren Gefährdungspotential nur durch eine ordnungsgemäße und schadlose Verwertung oder gemeinwohlverträgliche Beseitigung nach den Vorschriften des KrWG und der auf Grund dieses Gesetzes erlassenen Rechtsverordnungen ausgeschlossen werden kann.

Pflichten zur Entsorgung der Rotorblätter können dementsprechend einsetzen, wenn der Betrieb der WEA vom Anlagenbetreiber endgültig eingestellt wird und damit die bisherige Zweckbestimmung der Rotorblätter entfällt oder aufgegeben wird, ohne dass ein neuer Verwendungszweck unmittelbar an deren Stelle tritt. Für die Beurteilung der Zweckbestimmung ist nach § 3 Abs. 3 Satz 2 KrWG die Auffassung des Erzeugers oder Besitzers unter Berücksichtigung der Verkehrsanschauung zugrunde zu legen. Die für die Beurteilung der Zweckbestimmung im Sinne des subjektiven Abfallbegriffs maßgebliche Auffassung des Besitzers ist danach erforderlichenfalls nach Maßgabe der Verkehrsanschauung zu korrigieren (VG Augsburg, Beschl. v. 01.03.2021 ¬-Au 9 S 20.2585, juris Rn. 28).

Sollen die Rotorblätter demontiert werden, um anderenorts als Rotorblätter unmittelbar, d. h. ohne ein Verfahren der Vorbereitung zur Wiederverwendung, wiederverwendet zu werden, liegt bei ihrer Demontage nach Stilllegung der WEA kein Entledigungstatbestand des § 3 Abs. 1 KrWG vor, sodass auch keine Entsorgungspflicht für die Rotorblätter entsteht, es sei denn die Rotorblätter sind aufgrund ihres konkreten Zustands geeignet, gegenwärtig oder künftig das Wohl der Allgemeinheit, insbesondere die Umwelt, zu gefährden; sie wären dann auch trotz einer Weiterverwendungsabsicht des Anlagenbetreibers als sog. Zwangsabfall im Sinne von § 3 Abs. 4 KrWG zu entsorgen. Lediglich dann, wenn die Rotorblätter aufgrund ihres konkreten Zustands zwar geeignet sind, gegenwärtig oder künftig das Wohl der Allgemeinheit, insbesondere die Umwelt, zu gefährden, zur Gefahrenbeseitigung jedoch keine Entsorgung geboten ist, werden die Rotorblätter nicht zu Abfall und die von ihnen ausgehende Umweltgefährdung kann und muss ggfs. auf der Grundlage dann zur Anwendung kommenden Ordnungsrechts beseitigt werden.

Der LAGA-Ad-hoc-Ausschuss zu faserhaltigen Abfällen berichtet in seinem Abschlussbericht aus dem Juli 2019 zu faserhaltigen Abfällen als Beispiel für die Wiederverwendung glasfaserhaltiger Bauteile über rückgebaute Rotorblätter, die als Ersatzteile auf Freiflächen „eingelagert“ würden. Demontierte Bauteile, insbesondere auch Rotorblätter, würden zu dem Zweck, sie später als Ersatz für defekte Bauteile an baugleichen Anlagen zu nutzen, zwischengelagert. Begründet würde diese „Zwischenlagerung“ damit, dass die Bauteile bei den Herstellern bereits kurze Zeit

nach Auslaufen der Produktion einzelner Baureihen nicht mehr als Ersatzteil lieferbar seien. Die Betreiber seien daher gezwungen, bei Schäden auf Gebrauchtteile zurückzugreifen, um die Anlagen weiter betreiben zu können. Ob die entsprechenden Voraussetzungen zur Verneinung der Abfalleigenschaft im Falle dieser Zwischenlagerung als Ersatzteile gegeben seien, müsse im jeweiligen Einzelfall geprüft werden (Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) 2019).

Der Zeitpunkt der endgültigen Einstellung des Betriebs der WEA und des Anfalls von Rotorblattabfällen im Wege der Verwirklichung einer der drei genannten Entledigungstatbestände des § 3 Abs. 1 KrWG kann, aber muss insoweit nicht identisch sein. Denn solange die Rotorblätter nach der Stilllegung der Anlage noch nicht demontiert werden, solange sich der Anlagenbetreiber noch nicht zu einer Entledigung der Rotorblätter entschlossen hat, weil er sich z. B. noch auf der Suche nach einem Käufer für die möglicherweise noch funktionstaugliche WEA insgesamt oder die noch zur Wiederverwendung geeigneten Rotorblätter befindet, muss auch bei einer nach § 15 Abs. 3 S. 1 BImSchG angezeigten Stilllegung der WEA noch kein Rotorblattabfall angefallen sein.

Ob und inwieweit es sich bei abgelegten oder zwischengelagerten Rotorblättern um Abfall handelt, ist eine Frage des Einzelfalls. Nach § 3 Abs. 3 Satz 1 Nr. 2 KrWG ist ein Wille zur Entledigung im Sinne von § 3 Abs. 1 KrWG hinsichtlich solcher Stoffe oder Gegenstände anzunehmen, deren ursprüngliche Zweckbestimmung entfällt oder aufgegeben wird, ohne dass ein neuer Verwendungszweck unmittelbar an deren Stelle tritt. Für die Beurteilung der Zweckbestimmung ist nach § 3 Abs. 3 Satz 2 KrWG die Auffassung des Erzeugers oder Besitzers unter Berücksichtigung der Verkehrsanschauung zugrunde zu legen. Die für die Beurteilung der Zweckbestimmung im Sinne des subjektiven Abfallbegriffs maßgebliche Auffassung des Besitzers ist danach erforderlichenfalls nach Maßgabe der Verkehrsanschauung zu korrigieren (zur Beseitigungspflicht bei gelagerten bzw. abgestellten Altautos siehe aktuell z. B. VG Augsburg, Beschl. v. 01.03.2021 - Au 9 S 20.2585, juris Rn. 28).

Dabei mag auch die Lagerdauer eine Rolle spielen. Je länger die Rotorblätter ohne konkrete Verwendungsabsicht gelagert werden, desto mehr spricht dafür, dass sie nicht mehr zweckentsprechend verwendet werden können oder sollen. Auch die Notwendigkeit, witterungsbedingte Schäden nach längerer Lagerung vor einer Weiterverwendung durch Reparatur- und Reinigungsmaßnahmen beseitigen zu müssen, spricht dafür, dass es sich bei den Rotorblättern um Abfall handelt (zu solchen witterungsbedingten Substanzschäden bei abgestellten PKW siehe VGH München, Beschl. v. 08.12.2014 – 22 CE 14.2388, juris Rn. 25). Zwar wird anerkannt, dass die ursprüngliche Zweckbestimmung dann erhalten bleibt, wenn die Sache aktuell nicht benutzbar, wohl aber reparaturfähig ist (Petersen 2014, 2014, § 3 Rn. 83 m.w.N.). Für die Beurteilung der Reparaturfähigkeit ist aber neben der technischen Möglichkeit auch die wirtschaftliche Realisierbarkeit zu prüfen. Hierfür wird auf das Verhältnis zwischen Reparaturaufwand und Verkehrswert abgestellt (Petersen 2014, 2014, § 3 Rn. 83).

Für das Vorliegen einer hinreichend konkreten Wiederverwendungsabsicht bezüglich der ursprünglichen Zweckbestimmung oder des Bestehens eines neuen Verwendungszwecks trifft den Pflichtigen eine Darlegungspflicht (VGH München, Beschl. v. 14.11.2019 – 20 ZB 19.1010, juris Rn. 16; Beschl. v. 13.03.2013 – 20 ZB 13.8, juris Rn. 5; OVG Koblenz, Beschl. v. 24.08.2009 – 8 A 10623/09, juris Rn. 11) wie auch für die Wirtschaftlichkeit einer Reparatur (VGH München, Beschl. v. 14.11.2019 – 20 ZB 19.1010, juris Rn. 16; OVG Berlin-Brandenburg, Urt. v. 05.02.2009 – OVG 11 B 19.08, juris Rn. 38).

Der Besitzer abgelegter Rotorblätter muss dementsprechend plausibel darlegen, dass die Blätter weiter verwendungsfähig sind, dass sie ggfs. reparaturfähig sind und dass die Wiederverwendung bzw. die Reparatur ins Auge gefasst und in absehbarer Zeit auch realisiert wird (Petersen 2014, 2014, § 3 Rn. 83).

Im Einzelfall kann nicht nur der Zeitpunkt des Anfalls des Rotorblattabfalls selbst, sondern schon der Zeitpunkt der endgültigen Einstellung des Betriebs der WEA schwierig zu bestimmen sein, wenn der Anlagenbetreiber keine entsprechende Erklärung bzw. Anzeige der beabsichtigten Stilllegung abgibt. Zumeist wird angenommen, dass der Betrieb einer Anlage endgültig eingestellt ist, wenn keine Handlungen mehr vorgenommen werden, die dem Betriebszweck dienen, und wenn mit der Wiederaufnahme des Betriebes – jedenfalls in absehbarer Zeit – nicht zu rechnen ist (Dietlein 2014, 2014, § 5 BImSchG Rn. 214 f.; VG Magdeburg, Urt. v. 03.12.2013 – 2 A 232/11, juris Rn. 38), unabhängig davon, ob der Anlagenbetreiber den Betrieb freiwillig einstellt oder auf Grund einer behördlichen Maßnahme bzw. sonstiger Umstände, etwa höherer Gewalt, dazu gezwungen ist (Dietlein 2014, 2014, § 5 BImSchG Rn. 214 f.; Hansmann 1993, S. 925; Jarass 2014, 2020, § 5 Rn. 109; BT-Drs. 11/4909, 15).

Umstritten ist, ob und unter welchen Voraussetzungen eine nur vorübergehende Einstellung des Anlagenbetriebs dem Anwendungsbereich des § 5 Abs. 3 BImSchG unterliegt und damit auch eine Entsorgungspflicht auslösen könnte. Überwiegend wird angenommen, dass Nachsorgepflichten erst einsetzen, wenn die zeitweilige Einstellung des Betriebs nach der Vorstellung des Betreibers drei Jahre dauern soll oder tatsächlich die Dauer von drei Jahren überschreitet (Hansmann 1993, S. 924). Damit wird in Anlehnung an § 18 Abs. 1 S. 2 BImSchG auch der faktische Nichtbetrieb über drei Jahre von der „Nachsorgepflicht“ umfasst (Dietlein 2014, § 5 BImSchG Rn. 215; Jarass 2020, § 5 Rn. 109; Vallendar 1991, S. 93 f.; Roßnagel 2019, § 5 BImSchG Rn. 789).

Für die Stilllegung immissionsschutzrechtlich genehmigter WEA besteht eine Anzeigepflicht des Anlagenbetreibers; für die immissionsschutzrechtlich nicht genehmigungsbedürftigen WEA kann sich eine Anzeige- oder in Ausnahmefällen sogar eine Genehmigungspflicht aus der jeweiligen BauO der Länder ergeben (vgl. dazu LABO-Leitfaden „Anforderungen des Bodenschutzes an den Rückbau von Windenergieanlagen“ (Miller et al. 2021), S. 13; DIN SPEC 4866:2020-10, S. 11 und Tabelle A. 1 des Anhangs). In Hessen ist danach z. B. eine Baugenehmigung für den Rückbau erforderlich, in Bremen kann die Bauaufsichtsbehörde oder die Kommune ein Baugenehmigungsverfahren fordern, in Baden-Württemberg kann auf Antrag des Bauherrn ein Baugenehmigungsverfahren durchgeführt werden, in Hamburg ist eine Abbruchgenehmigung notwendig und in Rheinland-Pfalz ist der Rückbau weder anzeige- noch genehmigungspflichtig. Unabhängig davon müssen Betreiber von WEA den Beginn von vorläufigen und endgültigen Stilllegungen sowie das Ende von vorläufigen Stilllegungen gem. § 5 Abs. 3 i.V.m. § 5 Abs. 5 S. 1 MaStR beim Marktstammdatenregister registrieren lassen.

§ 15 Abs. 3 S. 1 BImSchG bestimmt, dass der Anlagenbetreiber, wenn er beabsichtigt, den Betrieb der WEA einzustellen, dies unter Angabe des Zeitpunkts der Einstellung der zuständigen Behörde unverzüglich anzuzeigen hat. Der Anzeige sind nach § 15 Abs. 3 S. 2 BImSchG Unterlagen über die vom Betreiber vorgesehenen Maßnahmen zur Erfüllung der sich aus § 5 Abs. 3 und 4 BImSchG ergebenden Pflichten beizufügen. Welche konkreten Informationen oder Unterlagen die zuständige Behörde benötigt, um die Einhaltung der Nachsorgepflichten nach § 5

Abs. 3 BImSchG prüfen zu können, ist weder im Gesetz noch untergesetzlich verbindlich geregelt. Unabhängig davon ist nicht zweifelhaft, dass Angaben über Art, Menge und Zustand der vorhandenen und der noch zu erwartenden Abfälle geboten sowie über die Art und Weise der ordnungsgemäßen Entsorgung dieser Abfälle beizufügen sind (Jarass 2020, § 15 BImSchG Rn. 55). Der Betreiber der WEA muss dementsprechend seiner Stilllegungsanzeige eine Erläuterung beifügen, ob und ggfs. wann und wie die Rotorblätter noch wiederverwendet oder wie sie andernfalls entsorgt werden sollen. Dazu sind ergänzende Angaben des Anlagenbetreibers zu den im Rotorblatt verwendeten Materialien und Stoffen, zur Konstruktion der Rotorblätter, etc. erforderlich, weil nur mit Hilfe solcher Informationen die vom Anlagenbetreiber vorgesehenen Maßnahmen zur Behandlung der bei einer Betriebseinstellung vorhandenen Abfälle von der Genehmigungs- und Aufsichtsbehörde geprüft und nachvollzogen werden können. § 4 c Nr. 6 der 9. 9. BImSchV schreibt dazu ausdrücklich vor, dass die Antragsunterlagen Angaben zu den vorgesehenen Maßnahmen zur Behandlung der bei einer Betriebseinstellung vorhandenen Abfälle enthalten müssen.

Es ist deshalb sinnvoll, mit Hilfe einer Vollzugshilfe für die Genehmigungsbehörde zu klären, welche Informationen sie mit Blick auf später anfallende Rotorblattabfälle sie zur Entscheidung über den Genehmigungsantrag nach den §§ 20, 21 der 9. BImSchV benötigt und welche Anforderungen ergänzend und aktualisierend dazu später an die immissionsschutzrechtliche Stilllegungsanzeige zu stellen sind. Die Behörde sollte spätestens anlässlich der Stilllegungsanzeige dem Anlagenbetreiber ein konkretes Entsorgungskonzept für die Entsorgung der Anlage bzw. der Rotorblätter abverlangen.

Die Angaben des Betreibers der WEA zur Entsorgung der Rotorblätter anlässlich der Stilllegungsanzeige ergänzen und aktualisieren die Angaben, die bereits im Genehmigungsverfahren für die Errichtung und den Betrieb immissionsschutzrechtlich genehmigungsbedürftiger Anlagen vorgelegt werden müssen. Nach § 4 c Nr. 6 der 9. BImSchV müssen die Unterlagen sich auf Angaben zu den vorgesehenen Maßnahmen zur Behandlung der bei einer Betriebseinstellung vorhandenen Abfälle erstrecken. Es ist deshalb notwendig, dass die Betreiber einer WEA bereits im immissionsschutzrechtlichen Genehmigungsverfahren für die Zulassung der Errichtung und des Betriebs der WEA erläutern, was mit den Rotorblättern geschehen soll, wenn die Anlage später stillgelegt wird. Die Genehmigungsbehörde muss sich insoweit nicht mit allgemeinen Aussagen zufriedengeben, sondern kann verlangen, dass in diesem Zusammenhang auch entsorgungsrelevante Angaben gemacht werden, etwa zur Konstruktion einzelner Anlagenteile, zu verwendeten Stoffen und zur Verwertung von Glasfasern und Carbonfasern in den Rotorblättern.

Waren die im Genehmigungsverfahren dazu vorgelegten Unterlagen unzureichend oder erweist sich während der langen Betriebsdauer der WEA, dass die ursprünglich vorgesehenen Maßnahmen den Anforderungen nach § 5 Abs. 3 BImSchG nicht mehr genügen, kann die zuständige Aufsichtsbehörde den Betreiber der WEA auffordern, seine Angaben zu ergänzen bzw. zu aktualisieren. Weigert sich der Anlagenbetreiber, dem nachzukommen, kann die Behörde ihn dazu nach § 17 Abs. 1 S. 1 BImSchG im Wege einer nachträglichen Anordnung verpflichten. Die Behörde muss also nicht auf eine Stilllegungsanzeige nach § 15 Abs. 3 S. 1 BImSchG warten, um ggfs. eine Anordnung nach § 17 Abs. 4 a S. 2 BImSchG zu erlassen. Eine zwischenzeitliche Aktualisierung der nach § 4 c Nr. 6 der 9. BImSchV erforderlichen Angaben bietet sich bei WEA, für die eine Sicherheit geleistet werden muss, schon deshalb an, weil bei Veränderungen der voraussichtlichen Nachsorgekosten die Sicherheitsleistung entweder

rechtzeitig erhöht oder aber zur Vermeidung ihrer Unverhältnismäßigkeit verringert werden muss.

Die dem Anlagenbetreiber im Genehmigungsverfahren oder im Nachgang dazu abzuverlangende technische Dokumentation zur späteren Entsorgung der bei der Stilllegung der WEA anfallenden Rotorblattabfälle sollte u. a. die folgenden Informationen enthalten:

- Rotorblattgewicht,
- Rotorblattlänge,
- maximaler und minimaler Rotorblattumfang,
- Lage und Art der Befestigung am Rotor,
- Rotordurchmesser,
- Rotorgewicht,
- Lage des Schwerpunkts,
- Lage der Anschlagpunkte,
- Lage und Art von Unwuchtgewichten,
- CFK- und GfK-Kennzeichnung.

Anlässlich der angezeigten Einstellung des Betriebs der WEA können von der zuständigen Behörde nach § 17 Abs. 4a S. 2 BImSchG Anordnungen ergehen, um die Nachsorgepflicht des Betreibers der WEA gem. § 5 Abs. 3 BImSchG durchzusetzen. Adressat einer Nachsorgeanordnung ist derjenige, den die Nachsorgepflichten nach § 5 Abs.3 BImSchG treffen. Das ist derjenige, der im Zeitpunkt der Betriebseinstellung Anlagenbetreiber ist bzw. war. Zulässig ist eine solche nachträgliche Anordnung nach der angezeigten Stilllegung nur noch während des Zeitraums von einem Jahr. Die Frist beginnt mit der Betriebseinstellung zu laufen, sofern sie endgültig und vollständig ist (Jarass 2020, § 5 BImSchG Rn. 58). Allerdings ist umstritten, ob die Frist des § 17 Abs.4a S.2 BImSchG nur dann zu laufen beginnt, wenn die zuständige Behörde über die Einstellung informiert wurde, etwa durch eine Anzeige i. S. d. § 15 Abs.3 BImSchG (siehe dazu Jarass, 2020, § 5 Rn. 58).

Die Jahresfrist des § 17 Abs. 4 a S. 2 BImSchG hindert nicht eine nach anderen Gesetzen, insbesondere nach dem Naturschutzrecht, nach dem KrWG oder dem allgemeinen Polizei- und Ordnungsrecht mögliche Inanspruchnahme der Verantwortlichen für die Entsorgung der nach der Betriebseinstellung anfallenden Rotorblätter. Aus Spezialitätsgründen soll der Rückgriff auf das BBodSchG allerdings ausgeschlossen sein, wenn und soweit sich die Regelungen des BImSchG auf die bodenschützenden Aspekte der Stilllegung selbst beziehen (Dietlein 2014, § 5 BImSchG Rn. 215;, § 5 BImSchG Rn. 58). Das BBodSchG ist nach § 3 Abs. 1 Nrn. 9, 10 BBodSchG gegenüber Rechtsvorschriften des Baurechts und des Immissionsschutzrechts subsidiär, soweit diese Einwirkungen auf den Boden regeln. Dabei werden unter Einwirkungen auf den Boden Beeinträchtigungen der Bodenfunktionen, die schädliche Bodenveränderungen zur Folge haben können, verstanden.

Der LABO-Leitfaden „Anforderungen des Bodenschutzes an den Rückbau von WEA“, (Miller et al. 2021) (LABO Leitfaden 2021, S. 16), erläutert dazu, die Bodenschutzklausel des § 1a Abs. 2 S. 1

BauGB fordere für die Bauleitplanung z. B. den sparsamen und schonenden Umgang mit dem Boden und damit eine Begrenzung der Flächeninanspruchnahme. Das gelte auch beim Rückbau einer WEA. Der Umgang mit dem dabei anfallenden Bodenaushub falle neben dem Bodenschutzrecht auch unter das KrWG und unterliege den Grundsätzen der Vermeidung, Wiederverwendung, Verwertung und Beseitigung. Für nicht kontaminiertes Bodenmaterial, das am Herkunftsort für Bauzwecke verwendet werde, gelte § 2 Abs. 2 Nr. 11 KrWG. Nach dieser Vorschrift gilt das KrWG nicht für kontaminiertes Bodenmaterial und andere natürlich vorkommende Materialien, die bei Bauarbeiten ausgehoben wurden, sofern sichergestellt ist, dass die Materialien in ihrem natürlichen Zustand an dem Ort, an dem sie ausgehoben wurden, für Bauzwecke verwendet werden. Für die Zwischen- und Umlagerung von Bodenmaterial, das im Rahmen der Errichtung oder des Umbaus von baulichen und betrieblichen Anlagen am Herkunftsort wiederverwendet werde, würden im Gegensatz zur externen Verwertung von Bodenmaterial die Regelungen des § 12 BBodSchV nicht gelten (siehe § 12 Abs. 2 S. 2 BBodSchV).

Unabhängig davon fehlen ausweislich des Leitfadens „Anforderungen des Bodenschutzes an den Rückbau von Windenergieanlagen“ der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz (LABO)mit Stand vom Juli/August 2021 bislang verbindliche Regelungen, um die Bodenschutzbelange angemessen in die Anforderungen an den Rückbau von WEA einzubringen. Zwar lege die im Oktober 2020 veröffentlichte DIN SPEC 4866 „Nachhaltiger Rückbau, Demontage, Recycling und Verwertung von Windenergieanlagen“ erstmalig umweltbezogene Standards für die Demontage und das Recycling von WEA fest. Diese gingen allerdings aus Sicht des Bodenschutzes nicht ausreichend ins Detail (Miller et al. 2021, S. 7). Der Leitfaden der LABO dient der Konkretisierung dieser Anforderungen für den Bodenschutz. Auf planungs- und rückbautechnischer Ebene ist die DIN SPEC allerdings eine wichtige Referenz für Betreiber und Rückbauunternehmen und sollte möglichst bald und vollständig in eine reguläre DIN-Norm oder ein anderes verbindliches untergesetzliches Regelwerk überführt werden.

Anlass für eine Empfehlung, den Zeitpunkt des Anfalls von Rotorblattabfällen angesichts der geschilderten rechtlichen Unsicherheiten im Einzelfall untergesetzlich durch den Verordnungsgeber oder durch einen Erlass (z. B. durch Ergänzungen in den Windenergieerlassen) weiter zu konkretisieren, besteht nicht.

Soweit es um die sich aus § 35 Abs. 3 S. 3 BauGB ergebende Rückbaupflicht geht, muss der im Gesetz genannte Zeitpunkt der dauerhaften Aufgabe der zulässigen Nutzung letztlich von der Aufsichtsbehörde und im Bestreitensfall von den zuständigen Verwaltungsgerichten durch Auslegung des § 35 Abs. 3 S. 2 BauGB im Einzelfall bestimmt werden. Auch hinsichtlich der Entledigungstatbestände des § 3 Abs. 1 KrWG kommt es letztlich auf die Auslegung dieser gesetzlichen Entledigungstatbestände durch die Gerichte im Einzelfall an, sodass eine untergesetzliche Konkretisierung oder Norminterpretation durch den Verordnungsgeber oder im Rahmen einer Verwaltungsvorschrift das Risiko mit sich brächte, die zutreffende Auslegung durch die Gerichte zu verfehlen. Die verbleibende Unsicherheit über den Beginn der Entsorgungspflicht im Einzelfall dürfte in der Praxis nicht zu erheblichen Problemen führen.

Im Rahmen einer Vollzugshilfe wäre es allerdings sinnvoll, die Kriterien, die im Rahmen der Verkehrsanschauung für die Abfalleigenschaft von Rotorblättern sprechen, zusammenzufassen. Dazu gehören u. a.:

- Funktionstauglichkeit,
- Zustand der Rotorblätter/Reparaturbedürftigkeit,
- Vorliegen einer hinreichend konkreten Wiederverwendungsabsicht.

7.2.1.2 Ende der Abfalleigenschaft

Für die Frage, welche abfallrechtlichen Anforderungen an die Entsorgung von Rotorblattabfällen zu stellen sind, ist auch das Ende der Abfalleigenschaft von Bedeutung, zu dem der Anwendungsbereich des KrWG endet, soweit es nicht auch Anforderungen an die Vermeidung von Abfällen richtet. Nach § 5 Abs. 1 KrWG endet die Abfalleigenschaft eines Stoffes oder Gegenstandes, wenn dieser ein Recycling oder ein anderes Verwertungsverfahren durchlaufen hat und so beschaffen ist, dass

- er üblicherweise für bestimmte Zwecke verwendet wird,
- ein Markt für ihn oder eine Nachfrage nach ihm besteht,
- er alle für seine jeweilige Zweckbestimmung geltenden technischen Anforderungen sowie alle Rechtsvorschriften und anwendbaren Normen für Erzeugnisse erfüllt sowie
- seine Verwendung insgesamt nicht zu schädlichen Auswirkungen auf Mensch oder Umwelt führt.

Die LAGA berichtet, dass im Hinblick auf einen Aufschluss von CFK-Bauteilen und eine Rückgewinnung der Fasern „bislang“ (bis zum Berichtszeitpunkt Mitte 2019) nur das Pyrolyseverfahren für ein Recycling von carbonfaserverstärkten Kunststoffen erprobt sei. Das Produkt des Pyrolyseprozesses werde überwiegend als Kurzfasern oder als Mahlgut vermarktet. In der Produktion würden jedoch zumeist statt Recyclingfasern aus der Pyrolyse Neufasern für CFK eingesetzt. Da ein tragfähiger Markt für Sekundärfasern bislang noch nicht vorhanden sei, werde die Pyrolyse als Verwertungsweg wenig beschritten. Dies spreche für die fehlende Akzeptanz von Recyclingfasern auf dem Markt und sei ein Indiz dafür, dass die Qualität von Recyclingfasern der Marktnachfrage noch nicht entspreche (Zotz et al. 2019) (Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) 2019).

Ob und inwieweit es sich bei dem Faser-Output der Pyrolyse um Kurz- oder Langfasern handelt, ist allerdings von der Definition dessen, was Kurz- oder Langfasern sind, abhängig. Nimmt man an, dass die Länge von Kurzfasern maximal 1 cm beträgt, dann können Produkte des Pyrolyseprozesses sowohl als Kurz- als auch Langfaseren vermarket werden.

Fraglich bleibt unabhängig davon, ob und ggfs. wann für einzelne Fraktionen der recycelten Rotorblattabfälle ein Ende der Abfalleigenschaft definiert bestimmt werden kann oder ob zumindest für Rotorblattabfälle die gesetzlichen Voraussetzungen für das Ende der Abfalleigenschaft mit Hilfe von Kriterien weiter konkretisiert werden können. Für diese Fraktionen der Rotorblattabfälle wäre dann der seit dem Jahr 2020 neu geltende § 7a KrWG zu beachten, wonach natürliche oder juristische Personen, die Stoffe und Gegenstände, deren Abfalleigenschaft beendet ist, erstmals verwenden oder erstmals in Verkehr bringen, dafür zu sorgen haben, dass diese Stoffe oder Gegenstände den geltenden Anforderungen des Chemikalien- und Produktrechts genügen.

Rotorblätter bestehen in der Regel zu mehr alszu zwei Dritteln (bezogen auf die Masse) aus faserverstärkten Kunststoffen; hinzu kommen Balsaholz und/oder Schaumstoffe, Metalle, Beschichtungen, etc.

7.2.1.2.1 Eisen-, Stahl- oder Aluminiumschrott

Soweit bei der Entsorgung der Rotorblattabfälle Eisen-, Stahl- oder Aluminiumschrott anfällt, ist die EU-Abfall-Ende-Verordnung für Eisen-, Stahl- und Aluminiumschrott (Europäischen Union 31.03.2011) zu beachten, die europaweit Kriterien festlegt, wann bestimmte Arten von Schrott nicht mehr als Abfall anzusehen sind. Die EU-Abfallende-Verordnungen sind unmittelbar geltendes Recht. Die nationalen Gesetz- bzw. Verordnungsgeber sind insoweit nicht berechtigt, abweichende Kriterien für die Beendigung der Abfalleigenschaft des jeweiligen Materials aufzustellen, es sei denn, dass es sich um strengere Sicherheitsvorschriften handelt.

Eisen-, Stahl- und Aluminiumschrott, der nicht mehr als Abfall eingeordnet werden soll, muss bestimmten Eingangskriterien vor dem Verwertungsverfahren entsprechen, bestimmten Behandlungsverfahren unterzogen werden und bestimmte Qualitätsanforderungen nach der Behandlung erfüllen (siehe dazu ausführlicher Cosson 2019, in: Beck OK Umweltrecht, 2019, § 5 KrWG Rn. 4). Insbesondere geht es dabei um eine Beschränkung des Gesamtanteils von Fremdstoffen, von Rost, Beschichtungen, Anstrichen, etc., und um das Freisein von sichtbarem Öl, Ölemulsionen, Schmiermitteln oder Fetten. Werden diese Abfallende-Kriterien für Schrott nicht erreicht, handelt es sich zwar weiterhin um Abfall; der Schrott kann aber gleichwohl in Stahlwerken, Gießereien und Schmelzwerken zur Herstellung von Endprodukten verwendet und verwertet werden. Die Abfallende-Kriterien der VO (EU) Nr. 333/2011 sind keine (technischen) Vorbedingungen für den weiteren Verwertungsprozess (Cosson 2019, § 5 KrWG Rn. 6). Bei Zugrundelegung sinnvollen technischen Aufwands und wirtschaftlich vertretbarer Mehrkosten sollen nach Schätzungen lediglich zwischen 10 und 20 % aller Materialien die Fremdstoffhürde überspringen und damit „produktfähig“ sein (Cosson 2019§ 5 KrWG Rn. 11).

7.2.1.2.2 Kupferschrott

Soweit bei der Entsorgung der Rotorblattabfälle Kupferschrott separiert wird, ist die EU-Abfall-Ende-Verordnung für Kupferschrott (Europäischen Union 25.07.2013) zu beachten, die Kriterien festlegt, unter welchen Voraussetzungen bestimmte Arten von Kupfer nicht mehr als Abfall anzusehen sind. Die Abfallende-Kriterien für Kupferschrott sind in Art. 2 VO (EU) Nr. 715/2013 festgelegt, wobei zu den Einzelheiten auf den Anhang I der Verordnung verwiesen wird.

Unabhängig von den genannten EU-Verordnungen gilt grds. nach der Rechtsprechung des EuGH für Metallschrott aus alten Maschinen, Fahrzeugen etc., der für eine Verwertung in der Stahlindustrie sortiert und behandelt wird, dass dieser durch die Sortierung und Behandlung noch nicht die Abfalleigenschaft verliert. Die Abfalleigenschaft endet insoweit erst dann, wenn nach dem Einschmelzen neue Metallprodukte hergestellt worden sind (EuGH, Urt. v. 11.04.2004 – C-457/02, NVwZ 2005, 306; Cosson, 2019, § 5 KrWG Rn. 29).

7.2.1.2.3 Balsaholz

Hinsichtlich des bei der Herstellung von Rotorblättern eingesetzten Balsaholzes ist nicht nur für die Verwertung, sondern auch für das Ende der Abfalleigenschaft die AltholzV beachtlich. Zwar konkretisiert die AltholzV im Wesentlichen Anforderungen an die Zulässigkeit bzw. Schadlosigkeit der Altholzverwertung auf der Grundlage des § 7 KrWG. Für die Bestimmung des

Endes der Abfalleigenschaft von Altholz ist die Verordnung jedoch ebenfalls von Bedeutung, weil die Abfalleigenschaft erst mit der vollständigen Erfüllung der Verwertungs- bzw. Beseitigungspflichten endet, die wiederum in der Verordnung näher bestimmt werden. Nach § 5 Abs. 1 S. 1 Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMUV) 15.08.2020 hat der Betreiber einer Altholzanlage sicherzustellen, dass bei einer von ihm vorgesehenen Verwertung nur die hierfür zugelassenen Altholzkategorien eigesetzt werden und dass das eingesetzte Altholz entfrachtet von Störstoffen und frei von PCB-Altholz ist.

§ 2 Nr. 4 AltholzV unterscheidet in Abhängigkeit von der Schadstoffbelastung vier Altholzkategorien und die Sonderkategorie „PCB-Altholz“. Für die Weiterverarbeitung zu Holzwerkstoffen sind die Altholzkategorien I und II uneingeschränkt, die Kategorie III nur eingeschränkt zugelassen, wenn Lackierungen und Beschichtungen durch eine Vorbehandlung weitestgehend entfernt worden sind oder im Aufbereitungsprozess entfernt werden (Ludwig et al. 2016).

Kommt eine Aufbereitung des Balsaholzes für die stoffliche Verwertung nicht in Betracht, muss es entweder energetisch verwertet oder zum Zwecke der Beseitigung nach 3§ 9 AltholzV einer thermischen Behandlungsanlage zugeführt werden.

Bei der Aufbereitung von Spänen oder Schnitzeln des Balsaholzes kann endet die Abfalleigenschaft unter Berücksichtigung der Umstände des jeweiligen Einzelfalls nach der Aufbereitung und Einhaltung der Anforderungen der AltholzV enden. Entscheidend bleibt aber auch in diesem Zusammenhang, ob im jeweiligen Einzelall die Voraussetzungen des § 5 KrWG vorliegen. Für das Recycling von Balsaholz werden in einem ersten Schritt zumeist Holzspäne oder Holzfasern hergestellt, die in weiteren Schritten zu Holzfaserdämmstoffen oder Holzschaum verarbeitet werden. Die Abfalleigenschaft des Altholzes endet erst mit der Verwendung der hergestellten Holzhackschnitzel oder Holzspäne für die Holzwerkstoffherstellung. Bei den durch die Aufbereitung des Balsaholzes erzeugten Holzhackschnitzeln und Holzspänen handelt es sich somit weiterhin noch um Abfälle, für die Anforderungen nach § 3 Abs. 1 S. 3 AltholzV an die Verwertung zu beachten und gem. § 6 AltholzV zu kontrollieren sind.

Bei der energetischen Verwertung von Altholz endet die Abfalleigenschaft mit dessen Einsatz als Ersatzbrennstoff, d. h. im Zeitpunkt der Energiegewinnung (Begründung der Altholzverordnung, BT-Drs. 14/8198, S. 22), bei der thermischen Behandlung zum Zwecke der Beseitigung mit der Beseitigung in der thermischen Behandlungsanlage.

Das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz plant eine Novellierung der Altholzverordnung zum Jahreswechsel 2022/2023.

7.2.1.2.4 Faserhaltige Abfälle

Ob und zu welchem Zeitpunkt die Abfalleigenschaft der faserhaltigen Fraktionen der Rotorblattabfälle enden kann, hängt davon ab, zu welchem Zeitpunkt die Voraussetzungen des § 5 KrWG erfüllt werden. Unzweifelhaft dürfte sein, dass weder die Separierung dieser Fraktionen noch ihre vorbereitende Aufbereitung für die weitere Entsorgung entweder über eine Pyrolyse oder bei der Zementherstellung oder auch auf einem anderen Verwertungsweg die Abfalleigenschaft entfallen lässt. Ob und ggfs. wann die Abfalleigenschaft endet, ist letztlich abhängig von dem gewählten Verwertungsprozess und den dabei entstehenden Verwertungsprodukten.

7.2.1.2.5 Carbonfaserhaltige Rotorblattabfälle

Für carbonfaserhaltige Rotorblattabfälle, aus denen mit Hilfe einer Pyrolyse wiederverwendbare Fasern oder ein verwendungsfähiges Mahlgut recycelt werden sollen, stellt sich die Frage, ob das Erzeugnis des Pyrolyseprozesses noch als Abfall oder als Produkt einzuordnen ist. Das hängt unter anderem davon ab, ob es einen tragfähigen Markt für die so hergestellten Sekundärfasern bzw. für das Mahlgut gibt. Die LAGA erläutert in ihrem Abschlussbericht zur Entsorgung faserhaltiger Abfälle, nach den ihr vorliegenden Informationen würden in der Produktion statt Recyclingfasern aus der Pyrolyse oftmals Neufasern für CFK eingesetzt. Ein tragfähiger Markt für Sekundärfasern sei bislang nicht vorhanden. Das spreche für eine fehlende Akzeptanz von Recyclingfasern auf dem Markt und sei außerdem ein Indiz dafür, dass die Qualität der Recyclingfasern der Marktnachfrage noch nicht entspreche (Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) 2019). Dementsprechend könnte auch noch nicht von einem Ende der Abfalleigenschaft bei den Recyclingfasern gesprochen werden, sodass diese entweder als Abfall verwertet oder beseitigt werden müssen. Dabei ist allerdings zu berücksichtigen, dass an das Bestehen eines Marktes zumeist keine besonders hohen Anforderungen gestellt werden. Im konkreten Einzelfall soll es bereits ausreichen, dass für das Erzeugnis ein einzelner Nachfrager vorhanden ist (Dippel und Ottensmeier 2018, S. 277; Petersen 2014, 2014, § 5 KrWG Rn. 35; Schink 2016, 2016, § 5 KrWG Rn. 34). Gefordert wird zusätzlich jedoch, dass der Marktwert des Erzeugnisses positiv ist, dass also für die Recyclingfasern ein Preis gezahlt wird, weil nur so angenommen werden könne, dass der Besitzer sich des Stoffes nicht lediglich entledigen wolle und dass eine weitere Verwendung tatsächlich zu erwarten ist (Dippel und Ottensmeier 2018, S. 277; Cosson 2019 Cosson, 2019, § 5 KrWG Rn. 39; zurückhaltender insoweit Kopp-Assenmacher 2015, 2015, § 5 KrWG Rn. 12).

7.2.1.2.6 Glasfaserhaltige Abfälle

Der Abschlussbericht der LAGA zu faserhaltigen Abfällen berichtet außerdem, dass glasfaserhaltige Abfälle aktuell unter ökonomischen Bedingungen nicht recycelt werden können. Die Kosten einer Trennung der Glasfasern von der mit ihr verbundenen Kunststoffmatrix seien zu hoch (Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) 2019, S. 43). Prozesse einer kommerziellen Verwertung von glasfaserhaltigen Abfällen sind bisher nur sehr eingeschränkt verfügbar (siehe dazu unter 5.3.3).

Das Ende der Abfalleigenschaft für die glasfaserhaltige Fraktion der Rotorblattabfälle kann aber bei der Herstellung von Zementklinkern erreicht werden (siehe dazu unter 5.3.3.2.2). Beim Einsatz glasfaserhaltiger Abfälle in Zementwerken dienten – so der LAGA-Abschlussbericht - die harzhaltigen Abfälle als Energielieferant und der Glasanteil als Mineralstofflieferant. Bei der Verbrennung im Drehrohrofen des Zementwerks werde das Siliciumdioxid der Glasfasern vollständig in den hergestellten Zementklinker und somit in ein neues Produkt eingebunden. Ein Austreten der Glasfasern und Stäube sei nicht mehr möglich (Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) 2019, S. 43). Das entspricht der Rechtsprechung des EuGH, wonach das Verwertungsverfahren erst dann vollständig durchlaufen ist, wenn keine abfallspezifischen Gefahren mehr zu befürchten sind (EuGH, Urt. v. 19.06.2003 - R. C-444/00, BeckRS 2004, 77291; siehe auch BVerwG, Urt. v. 14.12.2006 – 7 C 4/06, NVwZ 2007, 338; VG Cottbus, Urt. v. 17.06.2021 – 3 K 368/16, juris Rn. 33; VG Gelsenkirchen, Urt. v. 14.01.2020 – 9 K 5432/16, juris Rn. 40 ff; Dippel/Ottensmeier, 2018, S. 75). Bei der Herstellung von Zementklinkern endet mit der vollständigen Verbrennung und energetischen Verwertung aber auch die Abfalleigenschaft der harzhaltigen Kunststoffmatrix. Zu faserhaltigen Abfällen hat der VGH Kassel entschieden,

dass künstliche Mineralfasern durch ihre Zerkleinerung und Vermischung mit anderen Materialien noch nicht ihre Abfalleigenschaft verlieren würden, sondern dass erst nach einem weiteren Verwertungsschritt der Zumischung des unter Verwendung der faserhaltigen Abfälle entstandenen Gemisches bei der Ziegelherstellung die Abfalleigenschaft endet, weil durch das Brennen der Ziegel das abfalltypische Gefährdungspotential der Mineralwollabfälle dadurch beseitigt würde, dass die Strukturen der gemahlenen künstlichen Mineralfasern beim Brennen der Ziegel zerstört würden (VGH Kassel, Beschl. v. 09.10.2012 – 2 B 1860/12, NVwZ-RR 2013, 136, 137; siehe auch OVG Berlin-Brandenburg, Beschl. v. 23.05.2017 - OVG 11 S 78.16, juris Rn. 12).

Für das Ende der Abfalleigenschaft einzelner Fraktionen der Rotorblattabfälle sind unterschiedliche Regelwerke maßgeblich. Eine eigenständige Regelung zum Ende der Abfalleigenschaft von Rotorblattabfällen empfiehlt sich nicht.

Für den Vollzug wäre jedoch eine zusammenfassende Erläuterung der Kriterien zur Bestimmung des Endes der Abfalleigenschaft hilfreich.

7.2.2 Pflichten zur Vermeidung von Rotorblattabfällen

Sind die Rotorblätter nach der Stilllegung der WEA weiterhin funktionstauglich und sollen und können sie als solche für eine andere WEA, ob innerhalb desselben Windparks oder anderenorts, unmittelbar und ohne weitere Vorbereitungsmaß0nahmen weiterverwendet werden, dann handelt es sich bei ihnen nicht um entsorgungspflichtige Abfälle. Dasselbe gilt, wenn die WEA insgesamt für einen Weiterbetrieb an anderer Stelle verkauft und demontiert werden kann. Nicht zuletzt können auch Teile von Rotorblättern, die z. B. zum Ersatz beschädigter Rotorblätter verwendet werden können, aus dem Anwendungsbereich des KrWG herausfallen, weil sie mit ihrer Demontage nicht zu Abfall werden.

Vermeidung von Abfällen im Sinne des KrWG ist nach § 3 Abs. 20 S. 1 KrWG jede Maßnahme, die ergriffen wird, bevor ein Stoff, Material oder Erzeugnis zu Abfall geworden ist, und dazu dient, die Abfallmenge, die schädlichen Auswirkungen des Abfalls auf Mensch und Umwelt oder den Gehalt an schädlichen Stoffen in Materialien und Erzeugnissen zu verringern. Hierzu zählen auch die Wiederverwendung von Erzeugnissen oder die Verlängerung ihrer Lebensdauer. Wiederverwendung im Sinne des KrWG ist nach § 3 Abs. 21 KrWG jedes Verfahren, bei dem Erzeugnisse oder Bestandteile, die keine Abfälle sind, wieder für denselben Zweck verwendet werden, für den sie ursprünglich bestimmt waren.

Nach Erkenntnissen der LAGA soll ein relevanter Anteil der in Deutschland in den vergangenen Jahren abgebauten WEA zur weiteren Verwendung ins Ausland exportiert worden sein (Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) 2019, S. 41).

Eine konkrete Pflicht, noch funktionstaugliche Rotorblätter nach der Einstellung des Betriebs der WEA als solche für andere WEA weiterzuverwenden und damit einen entsprechenden Abfallanfall zu vermeiden, besteht aktuell jedoch nicht. Zwar würde mit einer solchen Weiternutzung des Rotorblatts für eine andere WEA das Entstehen von Rotorblattabfall vermieden, womit dem Vorrang der Abfallvermeidung vor der Verwertung oder Beseitigung von Abfällen im Sinne von § 6 Abs. 1 Nr. 1 KrWG Rechnung getragen würde. Allerdings richten sich die Pflichten zur Abfallvermeidung nach § 13 KrWG sowie den Rechtsverordnungen, die aufgrund der §§ 24 und 25 KrWG erlassen worden sind. Die Abfallhierarchie gemäß § 6 Abs. 1

und 2 KrWG begründet für sich genommen keine unmittelbaren Pflichten, sondern erst in Verbindung mit anderen Vorschriften, z. B. über die in § 7 Abs. 1 KrWG für Abfälle zur Verwertung und gem. § 13 KrWG für Anlagenbetreiber in Bezug genommenen Normen (VGH München, Beschl. vom 09.01.2019 – 22 CS 18.2003, juris Rn. 22; siehe dazu auch Krahnefeld/Conzelmann, 2014, S. 7).

Gem. § 13 KrWG richten sich die Pflichten der Betreiber von genehmigungsbedürftigen und nicht genehmigungsbedürftigen Anlagen nach dem BImSchG, diese so zu errichten und zu betreiben, dass Abfälle vermieden, verwertet oder beseitigt werden, nach den Vorschriften des BImSchG. § 5 Abs. 3 BImSchG schreibt für die immissionsschutzrechtlich genehmigungsbedürftigen WEA vor, dass diese so zu errichten, zu betreiben und auch stillzulegen sind, dass auch nach der Betriebseinstellung von der Anlage und dem Anlagengrundstück keine schädlichen Umwelteinwirkungen und sonstige Gefahren, erhebliche Nachteile und erhebliche Belästigungen für die Allgemeinheit und die Nachbarschaft hervorgerufen werden können. Außerdem müssen nach Betriebseinstellung vorhandene und die in diesem Zusammenhang anfallenden Abfälle ordnungsgemäß und schadlos verwertet oder ohne Beeinträchtigung des Wohls der Allgemeinheit beseitigt sowie der ordnungsgemäße Zustand des Anlagengrundstücks wiederhergestellt werden (§ 5 Abs. 3 Nrn. 2, 3 BImSchG).

Eine Verpflichtung zur Vermeidung von Rotorblattabfällen durch deren Wiederverwendung ergibt sich daraus nicht (Dietlein 2014, 2014, § 5 BImSchG, Rn. 229; Müggenborg 2016, 2016, § 13 KrWG Rn. 22).

Auch in einer Verordnung auf der Grundlage der §§ 24, 25 KrWG ist die verpflichtende Vermeidung von Rotorblattabfällen durch deren Wiederverwendung jedenfalls bislang nicht vorgesehen.

Eine Empfehlung an den Verordnungsgeber, die Betreiber von WEA zu verpflichten, nach einer Einstellung des Betriebs der WEA dafür zu sorgen, dass die Rotorblätter als solche für andere WEA weiterverwendet werden, käme nur in Betracht, wenn man davon ausgehen könnte, dass die Rotorblätter nach einer Stilllegung der WEA technisch noch für einen weiteren Einsatz als solche in einem relevanten Zeitraum tatsächlich noch verwendbar sind und wenn für in diesem Sinne gebrauchte Rotorblätter ein Markt vorhanden ist oder geschaffen werden kann. Das ist eine Frage des Einzelfalls; eine abstrakt/generelle Verpflichtung zur Weiterverwendung der Rotorblätter lässt sich insoweit kaum rechtfertigen.

Nach § 23 Abs. 2 Nr. 11 KrWG umfasst die Produktverantwortung zwar auch eine Obhutspflicht hinsichtlich der vertriebenen Erzeugnisse, insbesondere die Pflicht, beim Vertrieb der Erzeugnisse, auch im Zusammenhang mit deren Rücknahme oder Rückgabe, dafür zu sorgen, dass die Gebrauchstauglichkeit der Erzeugnisse erhalten bleibt und diese nicht zu Abfall werden. Die Obhutspflicht ist insoweit ein speziell geregelter Fall der Abfallvermeidung. Der Verordnungsgeber kann nach § 24 Nr. 10 KrWG bestimmen, dass beim Vertrieb bestimmter Erzeugnisse, auch im Zusammenhang mit deren Rücknahme oder Rückgabe, dafür zu sorgen ist, dass die Gebrauchstauglichkeit der Erzeugnisse erhalten bleibt und diese nicht zu Abfall werden. Grundsätzlich wäre es insoweit zulässig, vorausgesetzt es wäre technisch sinnvoll und es ließen sich gebrauchte Rotorblätter tatsächlich vermarkten, Vertreiber von WEA oder von Rotorblättern zu verpflichten, die Gebrauchstauglichkeit der Rotorblätter oder von abtrennbaren Teilen nach Stilllegung der WEA zu prüfen, sie gegebenenfalls zu erhalten und

dafür zu sorgen, dass sie weiterverwendet und damit nicht zu Abfall werden. Der Gesetzgeber sieht vor, dass eine solche Obhutspflicht auch im Zusammenhang mit einer Rücknahme oder Rückgabe der Erzeugnisse vorgesehen werden kann. Dementsprechend könnten Hersteller und Vertreiber von WEA bzw. von Rotorblättern verpflichtet werden, die Rotorblätter nach ihrer Demontage zurückzunehmen, ihre Funktionstauglichkeit zu prüfen und sie, soweit möglich, als solche zu vermarkten.

Zu bedenken ist dabei aber, dass die im Oktober 2020 neu eingeführte Obhutspflicht sich nur auf Vertreiber, nicht aber auf die Hersteller von Erzeugnissen bezieht (Gesetzesbegründung, BT-Drs. 19/19373, S. 58). Die Gesetzesbegründung erläutert dazu, dass der Vertrieb in Anlehnung an § 3 Abs. 12 und 13 VerpackG zu verstehen sei als das gewerbsmäßige Inverkehrbringen von Erzeugnissen, unabhängig davon, auf welcher Handelsstufe und mit welcher Vertriebsmethode dies erfolge. Auch das erstmalige Bereitstellen eines Erzeugnisses im Geltungsbereich des KrWG stelle sich als Inverkehrbringen und damit als Vertreiben dar. Funktional zähle zur Vertriebsphase auch der zum Zwecke des Inverkehrbringens durchgeführte Transport und die Lagerhaltung der Erzeugnisse. Nicht erfasst werde hingegen die vorgelagerte Phase der Herstellung eines Erzeugnisses, denn in der Produktionsphase könne aufgrund von technischen Herstellungsbedingungen der Anfall von Abfall nicht ausgeschlossen werden. Zudem enthalte bereits die Verpflichtung des Anlagenbetreibers nach § 5 Abs. 1 Nr. 3 BImSchG ein wirkungsvolles Instrument um die Abfallerzeugung in der Produktionsphase zu vermindern (Gesetzesbegründung, BT-Drs. 19/19373, S. 58).

Daraus folgt, dass auch Hersteller von WEA bzw. von Rotorblättern, soweit sie diese selbst vertreiben oder durch Überlassung an einen Vertreiber in den Verkehr bringen, Adressat einer Obhutspflicht sein können. Da die Obhutspflicht jedoch darauf gerichtet ist, Vertreiber von Erzeugnissen anzuhalten, dafür zu sorgen, dass ihre Erzeugnisse nicht zu Abfall werden, könnte sie beim Rückbau von WEA und bei der Demontage der Rotorblätter nur dann eine relevante Rolle spielen, wenn man annehmen könnte, dass den Herstellern technische Maßnahmen zur Erhaltung der Gebrauchstauglichkeit der Rotorblätter nach Stilllegung der WEA abverlangt werden könnten, die verhindern würden, dass die Rotorblätter zu Abfällen werden, dass sie also ohne Maßnahmen zur Vorbereitung der Wiederverwendung unmittelbar wieder für denselben Zweck zum Einsatz kommen können. Davon ist allerdings eher nicht auszugehen, weil nach der Demontage zumeist Instandhaltungs-, Reinigungs- und ggfs. Reparaturmaßnahmen vor einer Wiederverwendung notwendig werden dürften.

Sind die Rotorblätter nach ihrer Demontage zwar nicht unmittelbar wiederverwendbar, können sie oder Teile von ihnen jedoch auf der Grundlage einer Tauglichkeitsprüfung, einer Reinigung oder Reparatur zur Wiederverwendung vorbereitet werden, dann könnte auf der Grundlage der Abfallhierarchie des § 6 Abs. 1 KrWG i.V.m. der Verpflichtung der Betreiber von WEA nach § 7 Abs. 2 S. 1 KrWG und den Anforderungen zur Rangfolge und Hochwertigkeit der Verwertungsmaßnahme nach § 8 Abs. 1 KrWG eine Pflicht bestehen, bzw. durch den Verordnungsgeber nach § 8 Abs. 2 KrWG begründet werden, eine solche Wiederverwendung der Rotorblätter auch vorzubereiten.

Nach den Erkenntnissen der LAGA aus dem Jahr 2019 wurde zwar bis zu diesem Zeitpunkt eine Wiederverwendung von carbonfaserhaltigen Abfällen in Deutschland nicht vorbereitet (LAGA-Abschlussbericht Entsorgung faserhaltiger Abfälle, S. 19). Diese Einschätzung dürfte sich allerdings mehr auf carbonfaserhaltige Abfälle im Allgemeinen, nicht aber auf eine Vorbereitung

der Wiederverwendung ganzer Rotorblätter stillgelegter WEA beziehen. Von diesen berichtet der Abschlussbericht der LAGA, dass sie in einem nicht unerheblichen Umfang als Ersatzteile für eine Wiederverwendung zwischengelagert werden. Es kann insoweit wohl nicht ausgeschlossen werden, dass diese als Ersatzteile gelagerten Rotorblätter auch tatsächlich für eine Wiederverwendung vorbereitet werden (können).

Vorbereitung zur Wiederverwendung ist nach § 3 Abs. 24 KrWG jedes Verwertungsverfahren der Prüfung, Reinigung oder Reparatur, bei dem Erzeugnisse oder Bestandteile von Erzeugnissen, die zu Abfällen geworden sind, so vorbereitet werden, dass sie ohne weitere Vorbehandlung wieder für denselben Zweck verwendet werden können, für den sie ursprünglich bestimmt waren. Der Unterschied zwischen der Vorbereitung zur Wiederverwendung im Sinne von § 3 Abs. 24 KrWG zur Wiederverwendung im Sinne von § 3 Abs. 21 KrWG besteht darin, dass Erzeugnisse nicht unmittelbar für denselben Zweck wieder eingesetzt werden können, sondern ein vorbereitendes Verfahren der Prüfung, Reinigung und Aufbereitung durchlaufen müssen, bevor sie für denselben Zweck wiederverwendet werden können. Anders als die Wiederverwendung ist die Vorbereitung zur Wiederverwendung ein Verwertungsverfahren, für das die Grundpflichten der Kreislaufwirtschaft nach § 7 KrWG und die Hochwertigkeitsvorgaben des § 8 KrWG i.V.m. der Abfallhierarchie des § 6 Abs. 1 KrWG gelten. Die Vorbereitung der Rotorblätter oder auch nur von Teilen von ihnen zur Wiederverwendung ist danach keine Maßnahme der Vermeidung von Abfällen, sondern der Verwertung und gegenüber dem Recycling von Rotorblättern vorrangig. Rotorblätter, die als Ersatzteile mit dem Ziel ihrer Verwendung zwischengelagert werden, sind insoweit kein Abfall, wenn kein Verfahren der Prüfung, Reinigung oder Reparatur vor der weiteren Verwendung erforderlich ist; sie sind hingegen Abfall, soweit eine solche Maßnahme vor der weiteren Verwendung notwendig wird. Dass Rotorblätter nach der Stilllegung einer WEA, d. h. regelmäßig nach einer jahrzehntelangen Betriebsdauer, ohne ein Verwertungsverfahren der Prüfung, Reinigung oder Reparatur wieder einsatzfähig sind, dürfte eher selten sein und mag vor allem dann in Frage kommen, wenn die Rotorblätter zu einem späteren Zeitpunkt nachinstalliert worden sind, d. h. noch neueren Datums sind.

Soweit sich die Vorbereitung zur Wiederverwendung auch auf Bestandteile eines Erzeugnisses beziehen kann, ist auch der Übergang bzw. die Abgrenzung zum Recycling fließend. Recycling im Sinne des KrWG ist nach § 3 Abs. 25 KrWG jedes Verwertungsverfahren, durch das Abfälle zu Erzeugnissen, Materialien oder Stoffen entweder für den ursprünglichen Zweck oder für andere Zwecke aufbereitet werden; es schließt die Aufbereitung organischer Materialien ein, nicht aber die energetische Verwertung und die Aufbereitung zu Materialien, die für die Verwendung als Brennstoff oder zur Verfüllung bestimmt sind.

Der Verordnungsgeber könnte, gestützt auf § 24 Nr. 3 KrWG, bestimmen, dass Rotorblätter nur so in den Verkehr gebracht werden dürfen, dass ihre mehrfache Verwendung ganz oder in Teilen erleichtert wird. Das könnte z. B. die Zerlegbarkeit der Rotorblätter oder die saubere Trennbarkeit von glas- und carbonfaserhaltigen Teilen der Rotorblätter betreffen.

Im Kapitel 2 dieses Forschungsberichts wird z. B. über die Technologie segmentierter Rotorblätter berichtet. Zur Senkung der Kosten bei zunehmend größeren Rotorblättern wird erwogen, die Rotorblätter in Segmenten herzustellen, die am Aufstellungsort reversibel zusammengefügt werden können. Dazu wird in Kapitel 2 jedoch erläutert, dass bekannte Vorrichtungen und Apparaturen zum Verbinden der Rotorblattsegmente auch beachtliche

Nachteile haben können. Einige Vorrichtungen verursachten z. B. Probleme bei der Ausrichtung aufgrund der relativ großen Bewegungen in Spannweitenrichtung, die von den Rotorblattsegmenten während der Montage relativ zueinander erforderlich seien. Außerdem sei die Inspektion der benachbarten Segmente nach der Montage aufgrund der Komplexität schwierig. Darüber hinaus könnten z. B. die Aufbringung eines Klebematerials auf bekannte Vorrichtungen schwierig sein (siehe dazu näher unter 2.2.1.3). Solche Erkenntnisse sprechen gegen eine entsprechende Verpflichtung.

Beispielhaft, wenn auch nicht ohne Weiteres auf Rotorblätter übertragbar könnten Regelungen wie in § 8 Abs. 1 AltfahrzeugV sein. Der Verordnungsgeber könnte vorschreiben, dass zur Förderung der Abfallvermeidung

1. die Verwendung gefährlicher Stoffe in Rotorblättern zu begrenzen und so weit wie möglich zu reduzieren ist, dass das Recycling von Rotorblattabfällen zu erleichtern und die Notwendigkeit der Beseitigung gefährlicher Abfälle zu vermeiden ist,
2. bei der Konstruktion und Produktion von Rotorblättern der Demontage, Wiederverwendung und Verwertung, von Rotorblättern, ihren Bauteilen und Werkstoffen umfassend Rechnung zu tragen ist,
3. bei der Herstellung von Rotorblättern, soweit möglich, Recyclingmaterial verwendet werden soll.

Eine Regelung zur Begrenzung der Verwendung gefährlicher Stoffe bei der Herstellung von Rotorblättern ist allerdings nur in Betracht zu ziehen, soweit Rotorblätter gefährliche Stoffe enthalten. Als gefährliche Stoffe kommen insoweit z. B. Unwuchtgewichte aus Blei oder biozide Anstriche in Betracht. Der Abschlussbericht der LAGA zur Entsorgung faserhaltiger Abfälle (Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) 2019, S. 28) spricht von der Möglichkeit einer Einordnung von Carbonfasern als gefährliche Fasern i.S.v. § 6 Abs. 6 S. 2 Nr. 1 Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMUV) 27.04.2009 und schlägt separate Abfallschlüssel für faserhaltige Abfälle als gefährliche Abfälle vor. Ordnet man dementsprechend Glasfasern und/oder die Carbonfasern als gefährlich ein – der Abschlussbericht der LAGA zur Entsorgung faserhaltiger Abfälle, 2019, S. 28, spricht von der Möglichkeit einer Einordnung von Carbonfasern als gefährliche Fasern i.S.v. § 6 Abs. 6 S. 2 Nr. 1 DepV ¬-und schlägt für eine Festlegung separater Abfallschlüssel für faserhaltige Abfälle auch solche für gefährliche Abfälle vor -, dürfte die Verwendung solcher Fasern bei der Herstellung von WEA gleichwohl unverzichtbar sein.

Fraglich könnte allenfalls sein, ob Anlass besteht, Anforderungen an die Verwendung von für die Abfallentsorgung problematischen Stoffen oder Fasern bei der Herstellung der Rotorblätter zu richten. Eine entsprechende Empfehlung könnte berechtigt sein, wenn es belastbare Erkenntnisse dazu gäbe, dass von den verschiedenen Fasern, die bei der Herstellung von Rotorblättern Verwendung finden, einzelne Fasertypen spezifische Entsorgungsprobleme verursachen, und dass diese Fasertypen durch andere, weniger problematische Fasertypen ersetzt werden können (eine Übersicht zur Einteilung von Carbonfasern nach Fasertypen und -eigenschaften siehe Quicker et al. 2021, S. 8; siehe zur Typisierung carbonfaserhaltiger Abfälle auch die Hinweise des Landesverwaltungsamts Sachsen-Anhalt (Ministerium für Bau und Verkehr des Landes Sachsen–Anhalt 2005); allgemein sind knapp 200 unterschiedliche Carbonfasern auf dem Markt, siehe Nr. 3.5.1.1).

Der Verordnungsgeber kann die Verwendung bestimmter Materialien und Stoffe (z. B. pechbasierte Carbonfasern) bei der Herstellung von Rotorblättern beschränken.

Eine Verwendungsbeschränkung für pechbasierte bestimmte Carbonfasern könnte gerechtfertigt sein, weil bei deren mechanischer oder thermischer Beanspruchung, z. B. beim Recycling, arbeitshygienische Probleme auftreten können, soweit es in diesem Zusammenhang zur Freisetzung von Fragmenten im Nanometer- oder Mikrometerbereich oder von durch Abbrand in ihrem Durchmesser verringerten Fasern kommt (Bäger et al. 2019).

Wenn es mit vertretbarem Aufwand technisch möglich ist, die mehrfache Verwendung von Rotorblättern zu erleichtern, dann könnte der Verordnungsgeber dies in einer Verordnung näher festlegen. Allerdings kann man mit guten Gründen bezweifeln, ob allgemeine, eher appellartig formulierte Vermeidungsanforderungen vollzugstaugliche, effektive Verpflichtungen der Hersteller sein können. Wollte man konkretere Festlegungen dazu treffen, könnte man an Erkenntnissen zu Schadensursachen ansetzen und prüfen, ob und inwieweit Anlass besteht, im Sinne einer Schadensverringerung und der Verlängerung der Verwendungszeit der Rotorblätter verbindliche Vorgaben zu machen (zu den Ursachen für Schäden an Rotorblättern siehe im Einzelnen unter2.2.5). Solche Festlegungen könnten sich auf Mindeststandards für Blitzableitung, Enteisung, Oberflächenbeschichtung, der Ermüdungsabschätzung, Verwendung von entflammbaren Materialien, etc. beziehen. Sie müssten sich nicht nur auf den Herstellungsprozess beschränken, sondern könnten sich im Prinzip auch auf Wartung und Reparatur der Rotorblätter erstrecken.

Der Verordnungsgeber kann zur Vermeidung von Abfällen Festlegungen zur Produktgestaltung, zur Wartung und Reparatur der Rotorblätter regeln.

7.3 Entsorgungsverantwortung

Verantwortlich für die Entsorgung von Rotorblattabfällen nach der Stilllegung der WEA sind bei immissionsschutzrechtlich genehmigungsbedürftigen und nicht genehmigungsbedürftigen WEA die Betreiber dieser Anlagen. Das ergibt sich aus § 5 Abs. 3 BImSchG, wonach genehmigungsbedürftige Anlagen so zu errichten, zu betreiben und stillzulegen, dass auch nach einer Betriebseinstellung

1. von der Anlage oder dem Anlagengrundstück keine schädlichen Umwelteinwirkungen und sonstige Gefahren, erhebliche Nachteile und erhebliche Belästigungen für die Allgemeinheit und die Nachbarschaft hervorgerufen werden können,
2. vorhandene Abfälle ordnungsgemäß und schadlos verwertet oder ohne Beeinträchtigung des Wohls der Allgemeinheit beseitigt werden und
3. die Wiederherstellung eines ordnungsgemäßen Zustandes des Anlagengrundstücks gewährleistet ist.

Im Insolvenzfall kommt auch der Insolvenzverwalter in Betracht, wenn er die Anlage weiterbetreibt (VGH München, Beschl. v. 26.07.2021 – 12 ZB 18.2385, juris Rn 15; OVG NRW, Beschl. v. 31.03.2021 – 8 B 1160/20, juris Rn. 25; BVerwG, Urt. v. 23.09.2004 – 7 C 22.03, NVwZ 2004, 1505). Daneben und insbesondere bei den immissionsschutzrechtlich nicht genehmigungsbedürftigen WEA können die Anlagenbetreiber auch als Abfallerzeuger und Abfallbesitzer nach § 7 Abs. 2 S. 1 KrWG zur Verwertung der Rotorblätter verpflichtet sein.

Anlass für eine Empfehlung an den Verordnungsgeber, neben oder anstelle der Anlagenbetreiber auch Hersteller oder Vertreiber im Rahmen einer Produktverantwortung für die Entsorgung von Rotorblattabfällen entsorgungs- oder kostenverantwortlich zu machen, bestünde insbesondere dann, wenn befürchtet werden müsste, dass die Anlagenbetreiber zukünftig in relevantem Umfang nicht in der Lage wären, für eine ordnungsgemäße, schadlose und hochwertige Verwertung der Rotorblätter Sorge zu tragen, weil sie nicht genügend Rückstellungen für die Nachsorge gebildet haben und weil die Sicherheiten, soweit sie diese leisten mussten, nicht ausreichen, um die Entsorgung zu finanzieren. In erster Linie müsste einer unzureichenden Sicherheitsleistung allerdings durch entsprechende Nachforderungen auf der Grundlage des § 17 BImSchG begegnet werden.

Ein weiterer Anlass für die Einführung einer Produktverantwortung könnte bestehen, wenn die Sorge berechtigt wäre, dass Anlagenbetreibern zukünftig keine für die Entsorgung der Rotorblätter hinreichende Entsorgungsinfrastruktur zur Verfügung stünde. Das könnte z. B. dann der Fall sein, wenn bundesweit oder regional keine ausreichende Zahl von qualifizierten Entsorgungsfachbetrieben bereit und in der Lage wäre, die prognostizierte Menge an Rotorblattabfällen aufzubereiten (Zerkleinern, Klassieren und Sortieren) und danach ordnungsgemäß, schadlos und hochwertig zu verwerten.

Diese Sorge ist nicht fernliegend nachdem sich herausgestellt hat, dass faserhaltige Abfälle nicht in Müllverbrennungsanlagen und auch nicht Sonderabfallverbrennungsanlagen zur energetischen Verwertung eingesetzt werden sollten, dass es noch erheblichen Forschungsbedarf für den Umgang mit faserhaltigen Abfällen gibt und dass bislang nur einige wenige Anlagen überhaupt eine Verwertung der faserhaltigen Abfälle bewerkstelligen können (siehe auch dazu die Erkenntnisse aus Kapitel 6 dieses Forschungsvorhabens, Hinweise des Landesverwaltungsamts Sachsen-Anhalt, (Ministerium für Bau und Verkehr des Landes Sachsen–Anhalt 2005) Stand 10/2020 und den Bericht der LAGA zu faserhaltigen Abfällen, (Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) 2019, S. 31) 2019, S. 31, der eine Verpflichtung der Hersteller von Rotorblättern von WEA zur Rücknahme nach § 25 Abs. 1 Nr. 1 KrWG empfiehlt).

Nimmt man einen solchen Sachverhalt an, dann wäre zusätzlich noch zu hinterfragen, ob dieser Engpass sich auf die Entsorgung von Rotorblättern oder faserhaltigen Teilfraktionen davon beschränkt oder sich auch auf andere Erzeugnisse erstreckt, bei deren Entledigung faserhaltige Abfälle anfallen. Bejahendenfalls sind isolierte, auf die Entsorgung von Rotorblättern konzentrierte Lösungsstrategien zur Organisationsverantwortung für faserhaltige Abfälle möglicherweise nicht zielführend und mit Blick auf den Gleichbehandlungsgrundsatz rechtfertigungsbedürftig.

Es soll deshalb zunächst ein Überblick über die Entsorgungsverantwortung und die Rahmenbedingungen für die Sicherheitsleistung für die Entsorgung gegeben werden, bevor auf Möglichkeiten der Produktverantwortung von Herstellern und Vertreiber eingegangen wird.

7.3.1 Entsorgungspflicht der Betreiber von WEA

Dem Verursacherprinzip entsprechend sind für die Entsorgung von WEA und insbesondere von Rotorblattabfällen, die bei der Stilllegung von immissionsschutzrechtlich genehmigungspflichtigen und auch von nicht immissionsschutzrechtlich

genehmigungsbedürftigen, lediglich baurechtlich genehmigungs- oder auch nur anzeigebedürftigen WEA anfallen, deren Betreiber verantwortlich.

7.3.1.1 Genehmigungspflichten

WEA bedürfen auf der Grundlage der Landesbauordnungen regelmäßig ganz überwiegend einer Baugenehmigung. In verschiedenen Bauordnungen der Bundesländer ist allerdings vorgesehen, dass kleinere WEA bis zu einer bestimmten Höhe von ca. 10-15 Metern von der Baugenehmigungspflicht, nicht aber von den materiell-rechtlichen Anforderungen des Bauordnungsrechts freigestellt sind (siehe dazu Kloepfer 2016, § 18 Rn. 327). Zum Teil ist auch ein vereinfachtes Baugenehmigungsverfahren vorgesehen, in dessen Rahmen die Bauaufsichtsbehörde nur die Vereinbarkeit der Bauvorlagen mit dem städtebaulichen Planungsrecht, und spezifischen Vorschriften des Bauordnungsrechts prüft (siehe dazu beispielhaft die Erläuterungen des Ministeriums für Umwelt, Energie und Klimaschutz des Landes Niedersachsen, 2016). Diese kleineren Anlagen dürften aufgrund ihrer Materialeigenschaften mit Blick auf die Schwierigkeiten der Entsorgung von faserhaltigen Abfällen nicht im Vordergrund des Regelungsinteresses stehen.

WEA sind aber nicht nur bauliche Anlagen im Sinne des Bauordnungsrechts, sondern auch Anlagen im Sinne von § 3 Abs. 5 BImSchG; ab einer Gesamthöhe von mehr als 50 Meter sind sie nach Nr. 1.6 des Anhangs zur Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMUV) 02.05.2013 immissionsschutzrechtlich genehmigungsbedürftig. Handelt es sich um 20 oder mehr WEA an einem Standort, ist ein förmliches immissionsschutzrechtliches Genehmigungsverfahren mit Öffentlichkeitsbeteiligung erforderlich. Bei weniger als 20 Anlagen reicht nach Nr. 1.6 des Anhangs zur 4. BImSchV ein vereinfachtes Genehmigungsverfahren aus. WEA sind im Sinne der Ziffern 1.6.1 und 1.6.2 der 4. BImSchV zu Gruppen zusammenzufassen, wenn sie von derselben Betreiberin oder demselben Betreiber betrieben werden und

a) sich innerhalb einer bauleitplanerisch ausgewiesenen Fläche befinden, oder

b) sich ihr Einwirkungsbereich in Bezug auf die Schutzgüter des § 1 BImSchG überschneidet oder berührt.

Wird eine WEA modernisiert, müssen auf Antrag des Vorhabenträgers im Rahmen des Änderungsgenehmigungsverfahrens nach § 16 b Abs. 1 S. 1 BImSchG nur Anforderungen geprüft werden, soweit durch das Repowering im Verhältnis zum gegenwärtigen Zustand unter Berücksichtigung der auszutauschenden Anlage nachteilige Auswirkungen hervorgerufen werden und diese für die Prüfung nach § 6 erheblich sein können.

Soweit WEA immissionsschutzrechtlich genehmigt werden, entfaltet die immissionsschutzrechtliche Genehmigung gem. § 13 BImSchG eine Konzentrationswirkung, die sich auf die ansonsten für die WEA notwendige Baugenehmigung erstreckt. Eine gesonderte Erteilung der Baugenehmigung ist in diesen Fällen nicht erforderlich. Sämtliche materiell-rechtlichen Vorschriften, die bei Erteilung einer Baugenehmigung für die WEA zu beachten sind, bleiben auch im Rahmen der Konzentrationswirkung des § 13 BImSchG beachtlich.

Sind die WEA nicht immissionsschutzrechtlich genehmigungsbedürftig, gelten für sie zusätzlich zu den baurechtlichen Anforderungen noch die §§ 22-25 BImSchG für die nicht genehmigungsbedürftigen Anlagen.

§ 67 Abs. 9 BImSchG enthält eine Übergangsvorschrift, nach der Baugenehmigungen für WEA mit einer Gesamthöhe von mehr als 50 m, die bis zum 1. Juli 2005 erteilt worden sind, als Genehmigungen nach dem BImSchG gelten. Die WEA mit einer Gesamthöhe von mehr als 50 m ist insoweit auch dann in jeder Hinsicht wie eine (vereinfacht genehmigte) immissionsschutzrechtliche Anlage zu behandeln (Jarass 2020, BImSchG, 2020, § 69 Rn. 43; BVerwG, Urt. v. 21.12.2017 - 4 C 7/16, ZfBR 2018, 467). Für das Erlöschen einer gem. § 67 Abs. 9 Satz 1 BImSchG ab dem 1. Juli 2005 als immissionsschutzrechtliche Genehmigung fortgeltenden ursprünglichen Baugenehmigung für die Errichtung und den Betrieb einer WEA ist allein § 18 BImSchG maßgeblich; eine bauordnungsrechtlich geregelte zeitliche Beschränkung der Geltungsdauer von Baugenehmigungen für WEA ist damit entfallen (BVerwG, Urt. v. 21.12.2017- 4 C 7/16, ZfBR 2018, 467).

7.3.1.2 Rückbaupflichten

WEA können im planungsrechtlichen Außenbereich des § 35 Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB) 23.06.1960, im beplanten Innenbereich gem. § 30 BauGB und im unbeplanten Innenbereich nach § 34 BauGB planungsrechtlich zulässig sein (im Einzelnen dazu Kümper, 2022, 25; Wormit 2022, S. 324; Gatz 2013, 2013, ZV Rn. 1 ff.). WEA können insbesondere auch in Gewerbe- oder Industriegebieten (§§ 8, 9 BauNVO, vom 21.11.2017Bau) oder in Gebieten, die nach § 34 Abs. 2 BauGB als solche einzuordnen sind, als Gewerbebetriebe oder als Nebenanlagen (§ 14 BauNVO) und auch auf Versorgungsflächen nach § 9 Abs. 1 Nr. 12 BauGB zulässig sein.

7.3.1.2.1 Rückbaupflichten im Außenbereich (§ 35 Abs. 5 S. 2 BauGB)

Im Außenbereich sind WEA nach § 35 Abs. 1 Nr. 5 BauGB privilegiert. Für Vorhaben nach § 35 Abs. 1 Nr. 2 bis 6 BauGB ist gemäß § 35 Abs. 5 S. 2 BauGB eine Verpflichtungserklärung abzugeben, wonach das Vorhaben nach dauerhafter Aufgabe der zulässigen Nutzung zurückzubauen und Bodenversiegelungen zu beseitigen sind. Die Baugenehmigungsbehörde soll durch nach Landesrecht vorgesehene Baulast oder in anderer Weise die Einhaltung der Verpflichtung nach § 35 Abs. 5 Satz 2 BauGB sicherstellen.

Der Gesetzgeber will mit der gesicherten Rückbauverpflichtung vermeiden, dass der Allgemeinheit die Kosten für den Rückbau aufgebürdet werden, wenn der Anlagenbetreiber nicht willens oder finanziell nicht in der Lage ist, seinen Verpflichtungen nachzukommen (OVG Lüneburg, Urt. v. 10.01.2017 – 4 LC 198/15, juris Rn. 57). Da dies allein mit einer Baulast nicht zu erreichen ist, bedarf es dazu einer weiteren Sicherheit, z. B. durch eine Bürgschaft (Bankbürgschaft, Konzernbürgschaft oder Versicherungsbürgschaft).

Die Rückbauverpflichtung nach § 35 Abs. 5 S. 2 BauGB gilt allerdings nur für Anlagen im planungsrechtlichen Außenbereich (siehe zur Rückbauverpflichtung ausführlicher Mittelstein und Wurster 2020, Rückbau von WEA, 2020, S. 729; Becht und Lukas 2018, 2018, S. 11). Ziel der Rückbauverpflichtung des § 35 Abs. 5 S. 2 BauGB ist der Schutz des Außenbereichs dadurch, dass die Vorhaben nach dauerhafter Aufgabe der zulässigen Nutzung beseitigt werden und der Boden wieder entsiegelt wird. Damit soll eine Beeinträchtigung der Landschaft durch stillgelegte bzw. aufgegebene Anlagen mit einer zeitlich nur begrenzten Nutzungsdauer verhindert werden (Gesetzesbegründung, BT-Drs. 15/2550, S. 33; BVerwG, Urt. v. 17.10.2012 – 4 C 5/11, juris Rn. 19; Mittelstein/Wurster, 2020, S. 730).

Auf WEA, die im Geltungsbereich eines qualifizierten Bebauungsplans oder im unbeplanten Innenbereich nach § 34 BauGB errichtet und betrieben werden, kann die Rückbauverpflichtung des § 35 Abs. 5 S. 2 BauGB dementsprechend nicht angewendet werden.

Die Rückbauverpflichtung erstreckt sich auf eine Beseitigung sämtlicher Bodenversiegelungen und umfasst alle ober- und unterirdischen Anlagen und Anlagenteile sowie die für die Anlage erforderliche Infrastruktur, die mit der dauerhaften Nutzungsaufgabe der WEA ihren Nutzen verliert (Rieger 2019, 2019, § 35 BauGB Rn. 243).

Außerdem gilt die Rückbauverpflichtung des § 35 Abs. 5 S. 2 BauGB nur für Vorhaben, bei denen die bisherige Nutzung erst nach dem 20.07.2004 zulässigerweise aufgenommen worden ist (§ 244 Abs. 7 BauGB). Damit soll einem Vertrauensschutz Rechnung getragen werden, den Grundstückseigentümer genießen, die bei Beginn der Nutzung ihres Grundstücks für eine WEA nicht wissen konnten, dass eine Rückbauverpflichtung bei der Aufgabe dieser Nutzung auf sie zukommen könnte (Mittelstein und Wurster 2020).

Die Rückbauverpflichtung der Anlagenbetreiber ist von der Entsorgungspflicht für Rotorblattabfälle zu unterscheiden. Die Rückbauverpflichtung richtet sich auf die Beseitigung von Landschaftsbeeinträchtigungen nach der Stilllegung der WEA. In welcher Art und Weise die bei dem Rückbau anfallenden Abfälle zu entsorgen sind, ergibt sich nicht aus den planungsrechtlichen Vorgaben des BauGB zur Errichtung und zum Betrieb der WEA, sondern aus dem KrWG bzw. dem BImSchG.

Bei der Berechnung der Höhe der Sicherheitsleistung für den Rückbau, die nach § 35 Abs. 5 S. 3 BauGB zu fordern ist, sind aber auch die Entsorgungskosten für Rotorblattabfälle einzubeziehen. Einnahmen aus dem Recycling einer WEA, insbesondere von Stahlschrott, können dabei berücksichtigt werden, müssen dies nach der Rechtsprechung jedoch nicht. Die Rückbauverpflichtung erstreckt sich insoweit auch auf die Entsorgung der bei diesem Rückbau anfallenden Abfälle. Es handelt sich jedoch nicht um eine Regelung, aus der sich die materiell-rechtlichen Anforderungen an die Art und Weise dieser Entsorgung ergeben (im Einzelnen dazu unter 7.3.1.3).

7.3.1.2.2 Bauleitplanerische Festsetzung einer Rückbaupflicht

Für WEA im beplanten Innenbereich können die planenden Gemeinden nach § 9 Abs. 2 BauGB Festlegungen in den Bebauungsplan aufnehmen, wonach bestimmte der in ihm festgesetzten baulichen und sonstigen Nutzungen und Anlagen nur

1. für einen bestimmten Zeitraum zulässig oder
2. bis zum Eintritt bestimmter Umstände zulässig oder unzulässig sind.

Ergänzend dazu sieht § 249 Abs. 2 S. 1 BauGB vor, dass nach § 9 Abs. 2 Satz 1 Nr. 2 BauGB auch festgesetzt werden kann, dass die im Bebauungsplan festgesetzten WEA nur zulässig sind, wenn sichergestellt ist, dass nach der Errichtung der im Bebauungsplan festgesetzten WEA andere im Bebauungsplan bezeichnete WEA innerhalb einer angemessenen Frist, die im Bebauungsplan zu bestimmen ist, zurückgebaut werden. Die Standorte der zurückzubauenden WEA können nach § 249 Abs. 2 S. 2 BauGB auch außerhalb des Bebauungsplangebiets oder außerhalb des Gemeindegebiets liegen. Diese Festsetzungsmöglichkeit dient dem Repowering von WEA, d. h. der Ersetzung von älteren durch neuere, leistungsstärkere WEA (Söfker 2019a, 2019a, § 249 BauGB Rn. 9 unter Verweis auf die Begründung des Gesetzentwurfs, vgl. BT-Drs. 17/6076, S. 6).

Damit soll die Ausweisung neuer Standorte für moderne, leistungsstarke WEA und parallel dazu der Rückbau älterer WEA befördert werden. Das Ziel der Bauleitplanung besteht bei solchen Festsetzungen darin, sicherzustellen, dass die durch die Bauleitpläne vorgesehenen WEA nur zulässig sind, wenn ältere WEA zurückgebaut werden.

7.3.1.2.3 Wiederherstellung des ordnungsgemäßen Zustands des Anlagengrundstücks

Für die Betreiber von WEA, die immissionsschutzrechtlich genehmigt worden sind, besteht unabhängig von der Rückbauverpflichtung von § 35 Abs. 5 S. 2 BauGB eine Verpflichtung, nach der Betriebseinstellung einen ordnungsgemäßen Zustand des Anlagengrundstücks wiederherzustellen (§ 5 Abs. 3 Nr. 3 BImSchG). Das macht ebenfalls einen Rückbau der Anlage erforderlich.

7.3.1.2.4 Unwirksamwerden der Baugenehmigung nach Betriebseinstellung

Eine ausdrückliche gesetzliche Verpflichtung, eine lediglich baurechtlich genehmigte WEA zurückzubauen, ergibt sich weder aus dem Baurecht (Bauordnungsrecht/Bauplanungsrecht), noch aus den immissionsschutzrechtlichen Anforderungen für die nicht genehmigungsbedürftigen Anlagen nach den §§ 22-25 BImSchG. Umstritten ist, ob eine Rückbauverpflichtung besteht, wenn die Baugenehmigung unwirksam wird, weil entweder der WEA-Betreiber auf sie ausdrücklich verzichtet oder von ihr dauerhaft keinen Gebrauch mehr macht (siehe dazu Sittig-Behm 2020, S. 311). Wann eine rechtswirksam erteilte Baugenehmigung unwirksam wird, regelt sich allerdings in erster Linie nach dem jeweiligen Landesbauordnungsrecht. Dort kann z. B. vorgesehen sein, dass die Baugenehmigung erlischt, wenn innerhalb einer bestimmten Frist nach ihrer Erteilung mit der Ausführung des Bauvorhabens nicht begonnen oder die Bauausführung über einen bestimmten Zeitraum unterbrochen worden ist. Für das Erlöschen einer bestandskräftig erteilten und ausgenutzten Baugenehmigung kann, soweit die jeweilige BauO dazu nichts regelt, das Bundesministerium des Innern und für Heimat (BMI) 25.05.1976 maßgeblich sein. Nach § 43 Abs. 2 VwVfG bleibt ein Verwaltungsakt wirksam, so lange und so weit er nicht zurückgenommen, widerrufen, anderweitig aufgehoben oder durch Zeitablauf oder auf andere Weise erledigt ist. Es ist dann zu prüfen, ob das Nichtgebrauchmachen von der Genehmigung auf einen Verzichtwillen des Berechtigten schließen lässt (VGH Kassel, Beschl. v. 10.07.2014 – 3 A 893/14.Z, juris Rn. 6). Zum Teil wird angenommen, die Voraussetzungen für entsprechende Beseitigungsanordnungen nach den Bauordnungen der meisten Bundesländer lägen regelmäßig nicht vor; lediglich bei einem äußerlichen Verfall mit Gefahren der Standsicherheit könne eine Beseitigung der Anlage angeordnet werden. Nach anderer Ansicht ist bei endgültig aufgegebenen Anlagen von einer formellen und materiellen Baurechtswidrigkeit auszugehen, die zu einem bauaufsichtlichen Einschreiten zur Durchsetzung eines Rückbaus berechtigt (siehe im Einzelnen dazu den Abschlussbericht Umweltbundesamt, Zotz et al. 2019, S. 53 m.w.N.).

Das OVG SA führt dazu aus, dass WEA eine begrenzte technische und wirtschaftliche Nutzungsdauer haben. Die nach § 35 Abs. 1 Nr. 5 BauGB bestehende Privilegierung entfalle, wenn die Nutzung der WEA eingestellt werde. Dabei würden die allgemeinen Regeln gelten, wonach die Privilegierung nicht das Bauwerk, sondern in ihrer Zielsetzung die Nutzung zum Gegenstand habe. Werde die Nutzung eingestellt, entstehe ein baurechtswidriger Zustand. Die ungenutzte Anlage störe latent die Eigenart der Landschaft. Dieser Zustand löse materiell-rechtlich eine Beseitigungspflicht nach dem Bauordnungsrecht aus. Verpflichteter für die Beseitigung des baurechtswidrigen Zustands sei neben dem Betreiber der Anlage grundsätzlich auch der Grundstückseigentümer der Betriebsfläche als Zustandsstörer. Vielfach sei es in

Ermangelung einer sinnvollen Nachnutzung der Anlage nicht möglich, anderweitig baurechtmäßige Zustände herzustellen. Das werde im Regelfall dazu führen, dass die Bauaufsichtsbehörde aus bauplanungsrechtlichen Gründen eine Abrissanordnung zu treffen habe (OVG SA, Urt. v. 12.05.2011 – 2 L 239/09, juris Rn. 33 ff.).

Wird eine WEA nach dauerhafter Aufgabe der Nutzung der Windenergie nicht vom Betreiber der Anlage oder vom Eigentümer des Grundstücks selbst abgebaut, kann die Bauaufsichtsbehörde dem folgend den Rückbau durch eine bauaufsichtliche Beseitigungsverfügung nach dem Bauordnungsrecht der Länder anordnen und dies im Wege einer Ersatzvornahme nach dem Verwaltungsvollstreckungsgesetz des jeweiligen Bundeslandes auch vollstrecken. Im Falle der Zahlungsunfähigkeit des Betreibers kann die Bauaufsichtsbehörde für die Begleichung der Kosten der Ersatzvornahme auf die erbrachte Sicherheitsleistung zurückgreifen (siehe dazu die Erläuterungen des Hessischen Windenergieerlasses, Ministerium für Wirtschaft, Energie, Verkehr und Wohnen, Ministerium für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Hessen, Erlass zur Umsetzung der bauplanungsrechtlichen Anforderungen zur Rückbauverpflichtung und Sicherheitsleistung nach § 35 Abs. 5 Satz 2 und 3 BauGB bei der Genehmigung von WEA im Außenbereich, StAnz. 2019, Seite 850).

Für eine WEA, deren bisherige Nutzung vor dem 20.07. Juli 2004 zulässigerweise aufgenommen wurde, ergibt sich die Rückbauverpflichtung daraus, dass ein Bauwerk formell und materiell illegal wird, wenn bei einem nach § 35 Abs. 1 BauGB privilegierten Vorhaben die privilegierte Nutzung aufgegeben wird, weil die Anlage nur in ihrer durch die Nutzung bestimmten Funktion Bestandsschutz genießt. Auch in diesem Fall kann die zuständige Bauaufsichtsbehörde eine Beseitigungsverfügung erlassen und diese nach dem Landesverwaltungsvollstreckungsgesetz vollstrecken.

7.3.1.2.5 Rückbauverpflichtung nach Bundes-Bodenschutzgesetz

Schließlich kann sich eine Verpflichtung zum Rückbau einer WEA auch aus dem Bundes-Bodenschutzgesetz ergeben. Nach § 4 Abs. 3 S. 1 BBodSchG sind der Verursacher einer schädlichen Bodenveränderung und der Grundstückseigentümer verpflichtet, den Boden zu sanieren, sodass dauerhaft keine Gefahren, erhebliche Nachteile oder erhebliche Belästigungen entstehen. Für den Fall, dass der Verursacher bzw. der Grundstückseigentümer dieser Verpflichtung nicht nachkommt, sieht § 10 Abs. 1 S. 1 BBodSchG die Möglichkeit vor, dass die zuständige Behörde die notwendigen Maßnahmen trifft. Werden zur Erfüllung der Verpflichtung aus § 4 Abs. 3 und 6 BBodSchG Sicherungsmaßnahmen angeordnet, kann die zuständige Behörde nach § 10 Abs. 1 S. 2 BBodSchG verlangen, dass der Verpflichtete für die Aufrechterhaltung der Sicherungs- und Überwachungsmaßnahmen in der Zukunft Sicherheit leistet.

Voraussetzung für ein Einschreiten nach dem BBodSchG ist es allerdings, dass eine WEA, deren Betrieb dauerhaft eingestellt worden ist, als schädliche Bodenveränderung einzuordnen ist, dass dementsprechend Bodenfunktionen beeinträchtigt werden. Das ist insbesondere mit Blick auf das Fundament der WEA regelmäßig zu bejahen (siehe auch dazu den Abschlussbericht, Entwicklung eines Konzepts und Maßnahmen für einen ressourcenschonenden Rückbau von WEA, Seite 53).

Der LABO-Leitfaden „Anforderungen des Bodenschutzes an den Rückbau von Windenergieanlagen“, 2021, S. 16, erläutert dazu, inwieweit Anordnungen der

Bodenschutzbehörde zum Rückbau von WEA, namentlich auf der Basis von § 10 BBodSchG, möglich seien, sei noch nicht geklärt. Grundsätzlich könnten im Zusammenhang mit der Gefahrenabwehrpflicht nach § 4 Abs. 1 und 2 BBodSchG oder der Vorsorgepflicht nach § 7 BBodSchG, soweit sie durch die BBodSchV konkretisiert sei, Anordnungen der Bodenschutzbehörde nach § 10 Abs. 1 BBodSchG getroffen werden, um die Erfüllung der bodenschutzrechtlichen Pflichten im Einzelfall durchzusetzen. Dies gelte auch, wenn die Phase nach der Stilllegung einer Anlage ebenso den Regelungen des BImSchG unterliege. In Betracht kämen daher z. B. Anordnungen nach § 10 i. V. m. § 4 Abs. 1 und 2 BBodSchG oder konkreten Anforderungen der BBodSchV, die die Art des Rückbaus betreffen. Darüber hinaus wären auch Anordnungen denkbar, dabei eintretende schädliche Bodenveränderungen zu beseitigen (§ 10 i. V. m. § 4 Abs. 3 BBodSchG). Vorrangig seien jedoch etwaige Befugnisse nach Bau- oder Immissionsschutzrecht. Zum Teil werde in der Rechtswissenschaft die Möglichkeit angenommen, einen Rückbau materiell baurechtswidrig gewordener Anlagen anzuordnen. Teilweise würde jedoch die Ansicht vertreten, ohne Hinzutreten besonderer Umstände liege keine Gefahrensituation im Sinne einer schädlichen Bodenveränderung vor.

7.3.1.3 Pflicht zur ordnungsgemäßen und schadlosen Verwertung der Rotorblätter

Nach der Einstellung des Betriebs der WEA verbliebene oder zu diesem Zeitpunkt anfallende Abfälle hat der (letzte) Anlagenbetreiber ordnungsgemäß und schadlos zu verwerten bzw. ohne Beeinträchtigung des Wohles der Allgemeinheit zu beseitigen. § 5 Abs. 3 Nr. 2 BImSchG ist für den Zeitraum nach der Betriebseinstellung lex specialis gegenüber § 5 Abs. 1 Nr. 3 BImSchG.

Gem. § 13 KrWG gilt ein Anwendungsvorrang der Vorschriften des BImSchG gegenüber denen des KrWG. Allerdings gilt dieser Anwendungsvorrang nur für die zeitliche Phase der Errichtung und des Betriebs der WEA, nicht jedoch für die Zeit nach der endgültigen Einstellung des Betriebs (Müggenborg 2016, 2016, § 13 KrWG Rn. 22; Delfs 2019, 2019, § 13 KrWG Rn. 26; Petersen 2014, 2014, 13 KrWG Rn. 44; a.A. Dietlein 2014, 2014, § 5 BImSchG Rn. 227).

Genehmigungsbedürftige WEA sind nach § 5 Abs. 3 Nr. 2 BImSchG so stillzulegen, dass auch nach einer Betriebseinstellung vorhandene Abfälle ordnungsgemäß und schadlos verwertet oder ohne Beeinträchtigung des Wohls der Allgemeinheit beseitigt werden. Die Nachsorgepflichten des § 5 Abs. 3 Nr. 2 BImSchG sollen die bei Errichtung, Betrieb oder der Stilllegung entstandenen oder verwendeten Abfälle betreffen, nicht jedoch die stillgelegte Anlage selbst oder Teile der Anlage (Schmidt-Kötters 2019, 2019, § 5 BImSchG Rn. 178). Dementsprechend besteht auch für die Rotorblätter einer WEA keine Entsorgungspflicht nach § 5 Abs. 3 Nr. 2 BImSchG, solange diese nicht durch ihre Demontage und einen sich in diesem Zusammenhang verwirklichenden Entledigungstatbestand des § 3 Abs. 1 KrWG zu Abfällen geworden sind.

Im Gegensatz zur Grundpflicht nach § 5 Abs. 1 Nr. 3 BImSchG für die Errichtung und den Betrieb einer WEA besteht zwischen der Verwertung der auf dem Anlagengrundstück nach der Betriebseinstellung vorhandenen Abfälle und ihrer Beseitigung nach dem Wortlaut der Norm keine bindende Rangfolge („oder“). Soweit danach sowohl eine Verwertung als auch die Beseitigung zulässig ist, könnte der Anlagenbetreiber dem Wortlaut der Vorschrift nach – anders als bei § 5 Abs. 1 Nr. 3 BImSchG – ein Wahlrecht hinsichtlich der zu treffenden Maßnahmen besitzen (siehe dazu Dietlein, 2014, § 5 BImSchG Rn. 229; Jarass, 2020, § 5 BImSchG Rn. 116; Schmidt-Kötters, 2019, § 5 BImSchG Rn. 179). Ein Vorrang der Verwertung vor der Beseitigung dürfte jedoch über die Konzentrationswirkung des § 13 BImSchG und über die Beachtlichkeit

anderer öffentlich-rechtlicher Vorschriften nach § 6 Abs. 1 Nr. 2 BImSchG i. V. m. § 7 KrWG abzuleiten sein (Petersen, 2014, § 13 KrWG Rn. 44; Jarass, 2020, § 5 BImSchG Rn. 112; a.A. Schmidt-Kötters, 2019, § 5 BImSchG Rn. 161, der sich auf den Vorrang des Immissionsschutzrechts aus § 13 KrWG beruft, was allerdings nicht überzeugt, weil diese Vorschrift nicht für die Zeit nach Stilllegung der Anlage gilt).

Für die Entsorgung der Rotorblattabfälle nach Einstellung des Betriebs der WEA ist, soweit die Anlage immissionsschutzrechtlich genehmigt worden ist, der Anlagenbetreiber verantwortlich, der auch Inhaber der immissionsschutzrechtlichen Genehmigung ist. § 5 Abs. 3 BImSchG dehnt die Verantwortung des Anlagenbetreibers auf die Zeit nach der Betriebseinstellung aus (Dietlein, 2014, § 5 BImSchG Rn. 209). Die Verantwortung trifft den jeweils letzten Anlagenbetreiber (SächsOVG, Beschl. v. 19.04.2010 – 4 A 511/08, juris). Der Insolvenzverwalter als der letzte Betreiber einer nach dem BImSchG genehmigungspflichtigen Anlage darf ebenfalls zur Erfüllung der immissionsschutzrechtlichen Nachsorgepflicht in Anspruch genommen werden (VG Düsseldorf, Urt. v. 22.06.2015 – 3 K 3381/13, juris Rn. 18). Ein Insolvenzverwalter kann in diesem Sinne Betreiber der WEA sein, wenn er die Anlage des Gemeinschuldners kraft eigenen Rechts und im eigenen Namen fortbetrieben hat; es genügt, wenn dies auch nur für kurze Zeit geschehen ist; eine Mindestzeit ist insofern nicht vorgeschrieben (VGH BW, Beschl. v. 17.04.2012 – 10 S 3127/11, juris Rn. 4; VG Magdeburg, Urt. v. 03.12.2013 – 2 A 232/11, juris Rn. 37; VGH München, Beschl. v. 26.07.2021 – 12 ZB 18.2385, juris Rn 15; OVG NRW, Beschl. v. 31.03.2021 – 8 B 1160/20, juris Rn. 25; BVerwG, Urt. v. 23.09.2004 – 7 C 22.03, NVwZ 2004, 1505).

7.3.1.4 Sicherheitsleistung

Gegen eine Produktverantwortung für die Entsorgung von Rotorblattabfällen im Sinne gesonderter Rücknahmepflichten für Hersteller und Vertreiber könnte sprechen, dass die Anlagenbetreiber, die dem allgemein im Umweltrecht geltenden Verursacherprinzip entsprechend für die Entsorgung der Rotorblattabfälle verantwortlich sind, nicht nur immissionsschutzrechtlich überwacht zur Entsorgung der Rotorblattabfälle verpflichtet sind, sondern auch hinreichende Sicherheiten für die Entsorgung der Rotorblattabfälle zu stellen haben (siehe zum Verursacherprinzip im Umweltrecht z. B. Kloepfer, 2016, § 4 Rn. 92 ff; Rehbinder 2018, Rn. 140 ff; zum Verursacherprinzip im Abfallrecht Jacobj 2019, 2019, § 3 KrWG Rn. 55; Schink 2016, 2019, § 1 KrWG Rn. 2).

§ 35 Abs. 5 Satz 2 und 3 BauGB macht die Erteilung einer Baugenehmigung für WEA, welche von der immissionsschutzrechtlichen Genehmigung nach § 13 BImSchG miteingeschlossen ist, vom Erlass von Nebenbestimmungen zur Sicherstellung der Pflicht zum Rückbau nach dauerhafter Aufgabe der privilegierten Nutzung abhängig. Nach § 35 Abs. 5 Satz 3 BauGB soll die Baugenehmigungsbehörde durch nach Landesrecht vorgesehene Baulast oder in anderer Weise die Einhaltung der Verpflichtung zum Rückbau nach § 35 Abs. 5 S. 2 BauGB sicherstellen. Welche Sicherungsmaßnahme die Genehmigungsbehörde verlangt, steht in ihrem Ermessen (OVG SH, Urt. v. 24.06.2020 – 5 LB 4/19, juris Rn. 19; Söfker 2019b, 2019b, § 35 BauGB Rn. 166). Die Maßnahme soll umfassend sicherstellen, dass die wirtschaftlichen Lasten, die nach der Einstellung des Betriebs einer WEA mit dem vorgesehenen Rückbau verbunden sind, nicht von der öffentlichen Hand getragen werden müssen. Die Ermächtigung nach § 35 Abs. 5 Satz 2 i.V.m. Satz 3 BauGB umfasst alle Maßnahmen, die geeignet sind, die Einhaltung der Verpflichtungserklärung sicherzustellen, und damit auch die Auferlegung einer

Sicherheitsleistung als Maßnahme zur finanziellen Absicherung eines möglichen Liquiditätsrisikos, d. h. auch die Durchsetzung der Rückbaupflicht soll nicht daran scheitern, dass von einer Vollstreckung abgesehen wird, weil keine ausreichenden öffentlichen Mittel für eine Ersatzvornahme zur Verfügung stehen (BVerwG, Urt. v. 17.10.2012 - 4 C 5.11, juris, Rn. 15 OVG SH, Urt. v. 24.06.2020 – 5 LB 4/19, juris Rn. 29). Verfassungsrechtliche Bedenken gegen § 35 Abs. 5 Satz 3 BauGB bestehen nicht (BVerwG, Urt. v. 17.10.2012 – 4 C 5.11, juris, Rn. 11-13 sowie Rn. 17-19; OVG SH, Urt. v. 24.06.2020 – 5 LB 4/19, juris Rn. 30). Für immissionsschutzrechtlich genehmigungsbedürftige WEA im beplanten und unbeplanten Innenbereich können allerdings weder auf Grundlage des § 35 Abs. 5 S. 2 und 3 BauGB noch aufgrund § 5 Abs. 3 BImSchG Sicherheitsleistungen verlangt werden (Jarass 2020, § 5 BImSchG Rn. 115 a).

Für die Zulassung von Anlagen nach § 30 Abs. 1 und 2 BauGB (qualifizierter Bebauungsplan und vorhabenbezogener Bebauungsplan) sowie im Innenbereich nach § 34 BauGB greifen die Regelungen über die Rückbauverpflichtung aus § 35 Abs. 5 Satz 2 und 3 BauGB zwar nicht, d. h. eine Verpflichtung zum Rückbau ist dazu bauplanungsrechtlich nicht vorgesehen. Für diese Fälle wird empfohlen, in einer Nebenbestimmung zur Baugenehmigung eine Verpflichtung zum Rückbau nach dauerhafter Nutzungsaufgabe und eine Absicherung dieser Rückbauverpflichtung entsprechend anzuordnen (siehe dazu die Hinweise zur Umsetzung bauplanungs- und bauordnungsrechtlicher Anforderungen zur Rückbauverpflichtung und Sicherheitsleistung an WEA (WEA) des Ministeriums für Bau und Verkehr des Landes Sachsen–Anhalt vom 21.06.2005).

Das Bauordnungsrecht der Länder kann die Erteilung der Baugenehmigung u. a. für WEA von der Leistung eines geeigneten Sicherungsmittels abhängig machen, durch das die Finanzierung der Kosten des Rückbaus der Anlagen bei dauerhafter Nutzungsaufgabe gesichert ist (vgl. z. B. § 77 Abs. 3 Land Sachsen-Anhalt). Auch nach forstrechtlichen Bestimmungen kommt eine Sicherheitsleistung für die Rekultivierung nach Stilllegung einer im Wald errichteten WEA in Betracht (siehe z. B. § 10 Abs. 5 S. 2 Land Thüringen).

Bei einem Wechsel des Betreibers der WEA nach Baubeginn wird die Sicherheitsleistung vom neuen Betreiber im Austausch erbracht. Die vom bisherigen Betreiber gestellte Sicherheitsleistung bleibt so lange bestehen, bis die neue Sicherheitsleistung erbracht ist. Die Verpflichtung des neuen Betreibers zur Stellung einer Sicherheit soll durch eine Auflage im Genehmigungsbescheid im Sinne des § 36 Abs. 2 Nr. 4 VwVfG sichergestellt werden.

Eine Sicherheitsleistung kann und muss insoweit jedenfalls bei der ganz überwiegenden Zahl der WEA und insbesondere bei den großen Anlagen im Außenbereich verlangt werden., deren Rotorblätter derzeit nicht problemlos entsorgt werden können.

7.3.1.4.1 Arten der Sicherheitsleistung

Die Sicherheitsleistung kann erbracht werden nach den in § 232 BGB genannten Arten oder durch andere Sicherungsmittel, die zur Erfüllung des Sicherungszwecks geeignet sind (siehe z. B. Gemeinsamer Erlass des Hessischen Ministeriums für Wirtschaft, Energie, Verkehr und Wohnen und des Hessischen Ministeriums für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz zur Umsetzung der bauplanungsrechtlichen Anforderungen zur Rückbauverpflichtung und Sicherheitsleistung nach § 35 Abs. 5 Satz 2 und 3 BauGB bei der Genehmigung von WEA im Außenbereich vom 31.12.2016, StAnz. 2019, 850 (Hessisches

Ministeriums für Wirtschaft, Energie, Verkehr und Wohnen; Hessisches Ministeriums für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz 27.08.2019).

In Betracht kommen insbesondere die selbstschuldnerische Bank- oder Konzernbürgschaft, die unbedingt und unbefristet sein muss, die Hinterlegung der Sicherheitsleistung in Geld, die Verpfändung von Gegenständen oder Rechten (z. B. Grundschuld), ein Festgeldkonto, dessen Kündigungsfrist nicht mehr als sechs Monate beträgt und das durch die Behörde gekündigt werden kann oder der Abschluss von entsprechenden Ausfallversicherungen (siehe dazu die Hinweise zur Umsetzung bauplanungs- und bauordnungsrechtlicher Anforderungen zur Rückbauverpflichtung und Sicherheitsleistung an WEA (WEA) des Ministeriums für Bau und Verkehr des Landes Sachsen–Anhalt vom 21.06.2005; zum Auswahlermessen der zuständigen Behörde bei der Festsetzung eines Sicherungsmittels für Abfallentsorgungsanlagen nach § 17 Abs. 4 a S. 1 BImSchG siehe VGH Mannheim, Urt. v. 11.05.2021 – 10 S 709/19, juris).

7.3.1.4.2 Möglichkeiten der Pauschalierung

Das BVerwG (Urt. v. 17.12.2012- 4 C 5.11, BVerwGE 144, 341 Rn. 34) hat hinsichtlich der Kalkulation der Höhe der Sicherheitsleistung eine Pauschalierung akzeptiert, deren Zulässigkeit aber davon abhängig gemacht, dass die Kostenschätzung auf einer geeigneten Grundlage beruht und die daran anknüpfende Pauschalierung sachlich nachvollziehbar ist. Die Höhe der Sicherheitsleistung hängt von den Kosten ab, die voraussichtlich für den vollständigen Rückbau der WEA einschließlich der Wiederherstellung eines ordnungsgemäßen Zustandes des Grundstücks aufgewandt werden müssen.

Zur Vereinfachung wird pauschalierend zum Teil auf die installierte elektrische Leistung der WEA ausgegangen (siehe dazu Mitschang und Reidt 2019, 2019, § 35 BauGB Rn. 183). Teilweise wird auf die Nabenhöhe abgestellt (so z. B. der Windenergieerlass Niedersachsen vom 24.02.2016, Nds.MBl. v. 24.02.2016, Bl. 197, wonach sich die Höhe der Sicherheitsleistung in der Regel aus der Formel „Nabenhöhe der WEA [m] x 1000 [Euro/m] = Betrag der Sicherheitsleistung [Euro]“ ergeben soll). Im Windenergieerlass des Landes NRW vom 08.05.2018 (Nr. 5.2.2.4) heißt es, wenn nichts Gegenteiliges nachgewiesen werde, könne von einer Sicherheitsleistung in Höhe von 6,5 Prozent der Gesamtinvestitionskosten ausgegangen werden. Im Einzelfall könne sich aus der Konstruktion der WEA eine höhere oder niedrigere Sicherheitsleistung ergeben.

Das sind sehr pauschalierende Kostenschätzungen, die, wenn auch von der Rechtsprechung akzeptiert, möglicherweise die tatsächlichen Entsorgungskosten nur ungenau prognostizieren.

Bei der Ermittlung der Höhe der Sicherheitsleistung zum Zeitpunkt der Genehmigung der WEA sollen die Rückbaukosten für einen Zeitpunkt in weiter Zukunft bestimmt werden. Das unterscheidet die Sicherheitsleistung für WEA jedoch nicht von jenen für die Sicherheitsleistungen, die z. B. für Deponien oder für immissionsschutzrechtlich genehmigungsbedürftige Abfallentsorgungsanlagen zu erbringen sind (siehe dazu Beckmann, 2020, S. 121; VGH München, Beschl. v. 14.05.2020 – 22 ZB 20.245; VGH Mannheim, Urt. v. 11.05.2021 – 10 S 709/19, AbfallR 2021, 199; Holz, 2018, S. 177). Bei einer regelmäßigen Betriebsdauer von etwa 20- 25 Jahren können die Rückbaukosten in Abhängigkeit der allgemeinen Preisentwicklung auf den Zeitpunkt in 20 bis 25 Jahren nach Erteilung der Genehmigung bzw. der Inbetriebnahme der WEA umgerechnet werden. Hierfür kann auch eine Inflationspauschale hinzugerechnet werden. In der Rechtsprechung ist die Kalkulation einer

Inflationsrate von 40 % über einen Zeitraum von 20 Jahren akzeptiert worden (OVG SH, Urt. v. 24.06.2020 – 5 LB 4/19, juris Rn. 34). Da bei der Kostenschätzung auf den Zeitpunkt des Erlasses der Genehmigung abzustellen ist, kommt es letztlich auf die sich später tatsächlich einstellende Inflation während der Betriebszeit nicht an (OVG SH, Urt. v.24.06.2020 – 5 LB 4/19, juris Rn. 35; OVG Magdeburg, Urt. v. 12.05.2011 – 2 L 239/09, juris Rn. 48). Allerdings kann es aus Gründen der Verhältnismäßigkeit angezeigt sein, die Berechnung der Inflationsrate im weiteren Verlauf der Betriebszeit der WEA zu korrigieren und die Sicherheitsleistung dementsprechend anzupassen, wenn sich herausstellt, dass die Inflationsrate sich wesentlich anders entwickelt als prognostiziert.

Spätere Verwertungserlöse bei der Stilllegung der Anlage und der Entsorgung der dabei anfallenden Abfälle stehen der Bauaufsichtsbehörde nicht zu und müssen deshalb bei der Berechnung der Höhe der Sicherheitsleistung nicht berücksichtigt werden (OVG SH, Urt. v. 24.06.2020 – 5 LB 4/19, juris Rn. 36; OVG Lüneburg, Urt. v. 10.01.2017 – 4 LC 198/15, juris Rn. 60; VGH Mannheim, Urt. v. 31.03.2015 – 3 S 2016/14, juris Rn. 68). Bei einer Berücksichtigung der Restwerte würde das Risiko der Verwertung den Behörden auferlegt. Das ist vom Gesetzgeber nicht gewollt.

Nach der Rechtsprechung dürfen bei der Festlegung der Höhe der Sicherheitsleistung für Abfallentsorgungsanlagen auch Transportkosten berücksichtigt werden. Außerdem ist grundsätzlich auch ein pauschalierter Zuschlag in einer Höhe von 10- 20% für Analyse-, Umschlag-, Transportkosten und Unvorhergesehenes zulässig (VGH München, Beschl. v. 09.01.2019 – 22 CS 18.2003, juris Rn. 216).

Die WEA-Anlagenbetreiber haben sämtliche Kosten des Rückbaus und der Entsorgung der dabei anfallenden Abfälle zu tragen. Angesichts dieser bestehenden Kostentragungslast sind hohe Entsorgungskosten für die Entsorgung von Rotorblattabfälle kein für sich genommen taugliches Argument zur Einführung einer Produktverantwortung für Hersteller und Vertreiber von WEA bzw. von Rotorblättern. Entscheidend ist allerdings eine hinreichend verlässliche Kalkulation der Entsorgungskosten.

7.3.1.4.3 Weiterentwicklung der Kalkulation

Der UBA-Abschlussbericht 117/2019 hinterfragt zu Recht die Methoden zur Berechnung der Sicherheitsleistung für den Rückbau von WEA. Die Art und Weise der Berechnung könnte – so der Vorschlag – in einer Leitlinie oder auch in einer Verordnung konkretisiert und vereinheitlicht werden.

Fraglich ist in der Tat, ob derzeitige Kalkulationsgrundlagen, die sich an der Nabenhöhe der WEA, an der installierten elektrischen Leistung oder an einem Prozentsatz der Gesamtinvestition orientieren, eine hinreichend verlässliche Basis für die Kalkulation der Sicherheitsleistung sind. Der Abschlussbericht Umweltbundesamt 117/2019 (Bl. 201) bringt – wie der Windenergieerlass NRW – dazu eine Einbeziehung auch der Investitionskosten ins Gespräch. Ob allerdings die Investitionskosten bei der Errichtung der WEA tatsächlich in einem bestimmten Verhältnis zu den Rückbaukosten und insbesondere zu den Kosten der Entsorgung der Rotorblätter stehen, ist ebenfalls nicht unmittelbar plausibel.

Zu Recht wird außerdem im Abschlussbericht Umweltbundesamt 117/2019 auf die Gefahr hingewiesen, dass über vereinfachte Formeln zur Kalkulation der Sicherheitsleistung ein komplexes Konstrukt pauschal vereinfacht werde. Zielführender sei eine regelmäßige

Überprüfung der Sicherheitsleistung durch einen unabhängigen Sachverständigen, z. B. in einem Intervall von 10, 15, 18, 19 Jahren, nachfolgend jährlich. Zudem sollten einige Kernaspekte wie dem Vorhaben vorgeschlagene Anforderung an den Rückbau fest definiert sein. Außerdem sollten Erlöse aus dem Verkauf von Komponenten der Verwertung von Sekundärrohstoffen positiven Marktwert nach dem Rückbau der WEA nicht bereits heute Einfluss auf die Sicherheitsleistung nehmen, da die zukünftigen Marktwerte nicht verlässlich abgeschätzt werden könnten. Zugleich warnt der Abschlussbericht Umweltbundesamt 117/2019 allerdings vor zu hohen Anforderungen an den Rückbau und damit auch an die Bildung von Rückstellungen, die im Falle der Unverhältnismäßigkeit von den Gerichten korrigiert werden könnten und außerdem zu Ausweichverhalten der beteiligten Akteure führen würden, welches nur begrenzt durch verstärkte Kontrollen abgefangen werden könnte (Zotz et al. 2019, S. 202).

Die Kritik an der sehr pauschalen Kalkulation von Sicherheitsleistungen dürfte berechtigt sein. Die Berechnung einer Sicherheitsleistung anhand von Kriterien der elektrischen Leistung, der Nabenhöhe und eines Anteils an der Gesamtinvestition dürfte die tatsächlichen Rückbaukosten allenfalls annäherungsweise erfassen. Das kann zur Folge haben, dass die Sicherheitsleistung unverhältnismäßig hoch ausfällt oder umgekehrt nicht ausreicht, um die Rückbaukosten zu kalkulieren. Das könnte und sollte empirisch näher belegt werden. Vorzugswürdig wäre die Berechnung der Höhe der Sicherheitsleistung auf der Grundlage einer konkreten Kostenkalkulation, für die gegebenenfalls auch der Vorhabenträger/Antragsteller oder im Rahmen der Produktverantwortung Hersteller und Vertreiber Informationen liefern sollten.

Für die Entsorgung der Rotorblätter müsste es möglich sein, auf der Grundlage der in Betracht kommenden Verwertungsverfahren eine konkretere Kalkulation vorzulegen, die durch pauschalierende Zuschläge, z. B. zum Inflationsausgleich, ergänzt werden könnte. Die gilt jedenfalls dann, wenn erkennbar ist, welche Verwertungsverfahren konkret zur Verfügung stehen. Angesichts der Betriebszeiten der WEA von ca. 20 bis 25 Jahren liegt es nahe, dass die Kalkulation zu späteren Zeitpunkten überarbeitet werden muss, um neueren Erkenntnissen bzw. einem sich ändernden Stand der Technik Rechnung zu tragen.

Für die Kalkulation der Sicherheitsleistung kann sich ein Vergleich mit den Regelwerken anbieten, die eine Berechnung der Höhe von Sicherheitsleistungen für andere Anlagen, etwa für immissionsschutzrechtlich genehmigungsbedürftige Abfallentsorgungsanlagen oder Deponien, ermöglichen sollen. Die Sicherheitsleistung für immissionsschutzrechtlich genehmigte Abfallentsorgungsanlagen soll ihrer Höhe nach mindestens die Entsorgungskosten der bei der Stilllegung potentiell lagernden Abfälle abdecken (siehe dazu z. B. Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft und Energie des Landes Sachsen-Anhalt, Erlass zu Sicherheitsleistungen vom 01.12.2006, MBl. LSA 2017, 14, für Abfallentsorgungsanlagen). Die zuständigen Landesbehörden können dazu durchschnittliche Entsorgungskosten ermitteln, die als Orientierungshilfe genutzt werden und regelmäßig fortgeschrieben werden.

Die Festlegung der Höhe der Sicherheitsleistung kann in das Ermessen der zuständigen Behörde gestellt werden (vgl. z. B. zu § 18 Abs. 4 VerpackG VG München, Beschl. v. 09.07.2020 – M 17 S 20.2411, juris; Beckmann, 2020, S. 121 ff.). Wegen der eingeschränkten gerichtlichen Kontrolle gem. § 114 VwGO bietet es sich an, der Behörde insoweit Ermessen zuzubilligen.

Das Ermessen der Behörden ist nicht auf eine bestimmte Berechnungsmethode der Sicherheitsleistung reduziert. Die Behörde hat der Berechnung der Sicherheitsleistung im

Hinblick auf den Eintritt des Sicherungsfalls plausible und nachvollziehbare Maßstäbe zu Grunde zu legen, die auf die Ermittlung aller relevanten Tatsachen für die Berechnung gestützt sind. (VG München, Beschl. v. 09.07.2020 – M 17 S 20.2411, juris Rn. 44).

Die zuständige Behörde darf bei der Festsetzung der Höhe der Sicherheitsleistung auf ein "worst-case-Szenario" abstellen (VG Gelsenkirchen, Beschl. v. 02.06.2020 – 9 L 1960/19, juris Rn. 116; VG Stuttgart, Urt. v. 14.12.2017 - 14 K 2860/15, juris Rn. 101 zu § 6 Abs. 5 Satz 3 VerpackV a.F.). Es müssen dementsprechend – wie bereits erwähnt – nicht unbedingt noch ungewisse Wiederverwendungsmöglichkeiten oder kostengünstige Recyclingmöglichkeiten unterstellt werden. Vielmehr darf auch in die Kalkulation eingestellt werden, dass Rotorblattabfälle in größerem Umfang kostenungünstig verwertet oder beseitigt werden müssen, solange eben kostengünstigere und vorzugswürdige Alternativen der Entsorgung nicht hinreichend sicher sind.

Die Höhe der von der Behörde zu bestimmenden Sicherheitsleistung kann mit Hilfe von ermessenslenkenden Verwaltungsvorschriften auch generalisierend über den Einzelfall hinaus bestimmt werden (OVG SA, Urt. v. 25.10.2012 – 2 L 87/11, juris Rn. 45; VGH Mannheim, Urt. v. 11.05.2021 – 10 S 709/19, AbfallR 2021, 199). Dabei ist der Sicherungszweck, nämlich die aus § 5 Abs. 3 BImSchG folgende Nachsorgepflicht, in den Blick zu nehmen. Nach § 114 Satz 1 VwGO prüft das Gericht bei Ermessensentscheidungen, ob der Verwaltungsakt rechtswidrig ist, weil die gesetzlichen Grenzen des Ermessens überschritten sind oder von dem Ermessen in einer dem Zweck der Ermächtigung nicht entsprechenden Weise Gebrauch gemacht wurde. Die Ermessensausübung ist fehlerhaft, wenn die behördliche Entscheidung nicht auf einer zutreffenden tatsächlichen Grundlage beruht oder die Behörde den Sachverhalt in wesentlicher – d. h. entscheidungserheblicher – Hinsicht nicht vollständig und zutreffend ermittelt hat. Dabei überlässt es § 24 Abs. 1 und 2 i.V.m. § 26 Abs. 1 Bundesministerium des Innern und für Heimat (BMI) 25.05.1976 in den vom Gegenstand des Verfahrens gezogenen Grenzen jedoch grundsätzlich der nach pflichtgemäßem Ermessen zu treffenden Entscheidung der Behörde, welche Mittel sie zur Erforschung des Sachverhalts anwendet. Sofern sich die Behörde auf Schätzungen stützt, muss die Schätzung im Licht des Zwecks der Ermächtigungsgrundlage (§ 40 VwVfG) plausibel und in sich schlüssig sein. Bei der Ermittlung von Daten ist dabei u. a. zu berücksichtigen, dass ein möglichst wirklichkeitsgetreues Ergebnis erzielt wird. Die Behörde hat ihr Ermessen nach § 40 VwVfG entsprechend dem Zweck der Ermächtigung auszuüben und die gesetzlichen Grenzen einzuhalten. Eine Schätzung ohne Rückgriff auf verfügbare Anhaltspunkte -andere vorhandene oder bekannte Daten- wäre unverhältnismäßig (VG München, Beschl. v. 09.07.2020 – M 17 S 20.2411, juris Rn. 37 f.).

Es wäre insoweit hilfreich, wenn die für die Schätzung der Rückbaukosten notwendigen Daten bundeseinheitlich ermittelt und regelmäßig überprüft würden und den zuständigen Behörden für die Berechnung der Höhe der Sicherheitsleistung zur Verfügung gestellt werden.

Eine pauschalierende, einheitliche Berechnungsformel zur Erleichterung der Kalkulation der Entsorgungskosten ersetzt nicht die Ermittlung und Aktualisierung entsprechender Daten, weil die zuständigen Genehmigungsbehörden verpflichtet sind, die von ihnen verlangte Höhe der Sicherheitsleistung zumindest hinreichend plausibel zu machen.

Geht man davon aus, dass für die ganz überwiegende Zahl der WEA Sicherheitsleistungen zu erbringen sind, dass die Höhe der Sicherheitsleistung auf der Grundlage einer verbesserten

Datenlage konkreter kalkuliert werden kann und dass die zuständigen Behörden in der Lage sind, die Höhe der Sicherheitsleistung auf der Grundlage neuerer Erkenntnisse durch entsprechende nachträgliche Anordnungen nachzusteuern, dann dürfte das Risiko für den Staat bzw. die Allgemeinheit, nach der Stilllegung der WEA auf den Kosten des Rückbaus sitzen zu bleiben, überschaubar sein. Jedenfalls wäre das Kostenrisiko für sich genommen kein überzeugender Grund, eine Produktverantwortung neben der Entsorgungsverantwortung der Anlagenbetreiber einzuführen. Die Entsorgungskosten müssen vielmehr über Stromverkauf und Einspeisevergütung finanziert werden.

7.3.2 Entsorgungspflicht von Abfallerzeugern und Abfallbesitzern

Für die Frage, ob und inwieweit eine Produktverantwortung für den Rückbau der WEA bzw. konkret für die Verwertung der Rotorblätter eingeführt werden sollte, ist neben den zu vermeidenden Kostenrisiken für die Allgemeinheit auch von Bedeutung, wer für Rückbau und Entsorgung neben dem Anlagenbetreiber nach dem geltenden Recht verantwortlich ist. Die Antwort auf diese Frage kann dazu beitragen, die Erweiterung der Entsorgungsverantwortung auf Hersteller und Vertreiber plausibel zu machen. Denn wenn Hersteller oder Vertreiber von WEA bzw. von Rotorblättern schon als Abfallerzeuger derzeit entsorgungsverantwortlich wären, spräche dies eher gegen die Einführung einer Produktverantwortung im Sinne einer Rücknahmepflicht für Hersteller und Vertreiber.

Für den Rückbau der WEA ist der Bauherr bzw. der Anlagenbetreiber planungsrechtlich, bauordnungsrechtlich sowie immissionsschutzrechtlich verantwortlich. Die immissionsschutzrechtlichen Nachsorgepflichten lassen Nachsorgepflichten nach anderen Gesetzen unberührt. In Betracht kommen insoweit insbesondere Pflichten nach dem Kreislaufwirtschaftsrecht, dem Wasserrecht sowie dem Polizei- und Ordnungsrecht (Hansmann 1993, 921, 927).

Nach § 7 Abs. 2 S. 1 KrWG sind die Erzeuger oder Besitzer von Abfällen zur Verwertung ihrer Abfälle verpflichtet. Erzeuger von Abfällen im Sinne des KrWG ist jede natürliche oder juristische Person, durch deren Tätigkeit Abfälle anfallen (Ersterzeuger) oder die Vorbehandlungen, Mischungen oder sonstige Behandlungen vornimmt, die eine Veränderung der Beschaffenheit oder der Zusammensetzung dieser Abfälle bewirken (Zweiterzeuger).

Die Erzeugerverantwortung ist eine besondere Art der Verhaltensverantwortung. Der Abfallerzeuger kann nach § 22 S. 1 KrWG einen Dritten, insbesondere ein Entsorgungsunternehmen, mit der Erfüllung seiner Entsorgungspflichten beauftragen. Seine Verantwortlichkeit für die Erfüllung dieser Pflichten bleibt davon jedoch nach § 22 S. 2 KrWG unberührt. Sie endet erst, wenn die Entsorgung endgültig und ordnungsgemäß abgeschlossen worden ist (VG Frankfurt (Oder), Beschl. v. 09.04.2018 – 5 L 1423/17, juris; BVerwG, Urt. v. 28.06.2007 – 7 C 5/07, BVerwGE 129, 93; Jacobj, 2019, § 22 KrWG Rn. 8). Endgültig abgeschlossen ist die Entsorgung, wenn die Abfalleigenschaft des Stoffes oder Gegenstandes unter den in § 5 Abs. 1 KrWG genannten Voraussetzungen endet oder der Abfall im Zuge des Durchlaufens seines Verwertungsverfahrens als Abfall untergeht.

Abfallerzeuger ist derjenige, der als Inhaber der tatsächlichen Sachherrschaft die letzte Ursache für die Umwandlung einer Sache zu Abfall gesetzt hat. Das ist bei der Stilllegung und dem Rückbau einer WEA, die nicht wiederverwendet wird, der Anlagenbetreiber. Ausnahmsweise kann aber auch eine andere, vorgelagert handelnde Person als Abfallerzeuger einzuordnen sein,

wenn ihr Verhalten sich aufgrund besonderer Umstände bei wertender Betrachtung als wesentliche Ursache für die Abfallentstehung darstellt (BVerwG, Urt. v. 15.10.2014 – 7 C 1/13, NVwZ 2015, 153; OVG NRW, Urt. v. 10.8.2012 – 20 A 222/10, juris Rn. 35; Krahnefeld, 2015, S. 156). Die Einführung einer Produktverantwortung für Hersteller und Vertreiber die Entsorgung der Rotorblattabfälle wäre möglicherweise entbehrlich, wenn die Hersteller bereits als Abfallerzeuger neben den Anlagenbetreibern in der Entsorgungsverantwortung stünden.

Bei Abfällen, die durch Schadensfälle oder sonstige außergewöhnliche Ereignisse entstehen, soll in einer Kette von mehreren Ursachen auch die jeweilige Risikosphäre berücksichtigt werden (siehe dazu Hagmann 2013, S. 151; Versteyl und Grunow 2018, S. 71). Die Abfallerzeugerverantwortung kann nach der Rechtsprechung des EuGH und des BVerwG im Einzelfall sehr weit reichen. So hat der EuGH (Urt. v. 24.6.2008 – C-188/07, EuZW 2008, 433) im Falle eines auf hoher See havarierten Tankers die Inanspruchnahme des Herstellers des Tankers für die Entsorgung des mit dem Tanker beförderten Schweröls als Abfallerzeuger bestätigt. Das BVerwG hat in einem anderen Fall, in dem eine Anlage in Brand geraten war und die Feuerwehr das von ihr eingesetzte, erheblich kontaminierte Löschwasser aufgefangen und gesondert gelagert hatte, die Inanspruchnahme der Betreiberin der abgebrannten Anlage als Abfallerzeugerin des Löschwassers bejaht. Das Löschwasser sei zwar nicht durch eine eigene Tätigkeit der Anlageninhaberin angefallen. Diese habe aber eine erste Ursache für ein Tätigwerden der Feuerwehr gesetzt, da das Feuer von ihrem Betrieb ausgegangen sei (BVerwG, Urt. v. 15.10.2014 – 7 C 1/13, NVwZ 2015, 153).

Fraglich ist insoweit, ob auch Hersteller und Vertreiber von WEA bzw. von Rotorblättern als Abfallerzeuger angesehen werden können, dies insbesondere dann, wenn ein Betreiber der WEA nicht willens oder in der Lage ist, die Anlage im Falle einer nicht reparablen Funktionsstörung oder nach dem Ende der Betriebszeit ordnungsgemäß zurückzubauen bzw. die nach der Stilllegung der WEA anfallenden Rotorblattabfälle und zu entsorgen. Zur Beantwortung dieser Frage muss insbesondere das schon erwähnte Grundsatzurteil des BVerwG vom 15.10.2014 mit seiner ausführlichen Herleitung des Begriffs des Abfallerzeugers berücksichtigt werden.

Das BVerwG hat in diesem Urteil darauf hingewiesen, dass bei der Beantwortung der Frage, wer als Abfallerzeuger für die Entsorgung verantwortlich gemacht werden kann, eine einzelfallbezogene Wertung geboten ist, bei der zu berücksichtigen ist, dass der Vorgang der Abfallentstehung nur unter besonderen Umständen nicht demjenigen, der im Zeitpunkt der Umwandlung einer Sache in Abfall die Sachherrschaft über sie ausgeübt und durch sein Verhalten die letzte Ursache für die Abfallentstehung gesetzt hat, sondern einer anderen, im Vorfeld der Abfallentstehung handelnden Person als Abfallerzeuger zuzurechnen ist (BVerwG, Urt. v. 15.10.2014 – 7 C 1/13, NVwZ 2015, 153).

Nach dem Wortlaut der Legaldefinition hänge die Erzeugereigenschaft einer Person allein davon ab, dass Abfälle durch deren Tätigkeit angefallen seien. Anknüpfungspunkt sei also nicht ein bestimmtes Verhältnis zwischen Person und Sache, sondern ein auf die Sache mit einem bestimmten Ergebnis einwirkendes Verhalten der Person. Aus dem Wortlaut der Legaldefinition ergebe sich, dass nicht jedes für die Entstehung von Abfall ursächliche Verhalten ausreiche. Gefordert sei vielmehr eine Tätigkeit, die den Abfall anfallen lasse, also gerade für die Umwandlung der Sache oder des Stoffes in Abfall wesentlich sei. Typischerweise werde es sich um eine Tätigkeit des unmittelbaren Besitzers der Sache handeln. Das sei aber keineswegs zwingend. Auch eine andere Person könne etwa durch eine schädigende Handlung in einer

Weise auf eine Sache einwirken, dass diese zu Abfall werde. Wann der Ursachenbeitrag einer Person für die Entstehung von Abfall so wesentlich sei, dass der Abfall durch ihre Tätigkeit angefallen sei, lasse sich aus dem Normtext heraus nicht konkret beantworten; der Wortlaut mache aber deutlich, dass ein Zurechnungszusammenhang bestehen müsse, der naturgemäß nur aufgrund einer Bewertung anhand der Umstände des Einzelfalls bestimmt werden könne. In diesem Sinne lasse sich in Anlehnung an die ordnungsrechtliche Terminologie zum Verhaltensstörer vom Erfordernis einer unmittelbaren Verursachung sprechen, wobei Unmittelbarkeit typischerweise, aber nicht notwendig mit der jeweils letzten Ursache gleichzusetzen sei (BVerwG, Urt. v. 15.10.2014 – 7 C 1/13, juris Rn. 16; Beschl. v. 12.04.2006 - 7 B 30.06, juris Rn. 4).

Das BVerwG erläutert weiter, dass auch rechtssystematische Erwägungen für einen weiten Begriff des Abfallerzeugers sprächen. In dieser Hinsicht sei der Normzusammenhang des Kreislaufwirtschaftsrechts zu berücksichtigen, in den die Legaldefinition des Abfallerzeugers eingebunden sei; außerdem sei insoweit die Abfallrahmenrichtlinie zu beachten. Der Gesetzgeber habe mit seinen Legaldefinitionen des Abfallerzeugers und des Abfallbesitzers verdeutlicht, dass der Abfallerzeuger nicht ein bloßer Unterfall des Abfallbesitzers bzw. des früheren Besitzers sei. In den voneinander unabhängigen Definitionen des Abfallerzeugers und des Abfallbesitzers werde die Tendenz deutlich, den Kreis der Entsorgungspflichtigen nicht zu eng zu ziehen, um Verantwortungslücken auszuschließen. (BVerwG, Urt. v. 15.10.2014 – 7 C 1/13, juris Rn. 18 unter Verweis auf Urt. v. 18.10.1991 - 7 C 2.91, BVerwGE 89, 138, 141; Beschl. v. 05.11.2012 - 7 B 25.12, juris Rn. 12).

Das BVerwG verweist zudem auf die Rechtsprechung des EuGH (Urt. v. 07.09.2004 - Rs C-1/03, Van de Walle, Slg. 2004, I-7632, und vom 24.06.2008 - Rs. C-188/07, Commune de Mesquer, Slg. 2008, I-4501). Beide Entscheidungen stützten die Ansicht, dass Abfallerzeuger auch eine Person sein könne, die nicht die letzte Ursache für die Entstehung eines Abfalls gesetzt habe und bei Entstehung des Abfalls nicht in Besitz des zu Abfall gewordenen Stoffes gewesen sei. In der Sache Van de Walle habe der EuGH entschieden, dass ein Mineralölunternehmen, das eine Tankstelle beliefere, als Erzeuger des im Zuge des Tankstellenbetriebs mit Kraftstoffen verunreinigten Erdreichs und damit als Abfallbesitzer angesehen werden könne, wenn das Austreten der Kraftstoffe etwa aus einem in schlechtem Zustand befindlichen Tank auf einen Verstoß des Mineralölunternehmens gegen seine vertraglichen Verpflichtungen oder auf andere Machenschaften zurückzuführen sei, die die Haftung dieses Unternehmens auslösen könnten. Der EuGH stelle insoweit nicht auf Kriterien der Sachherrschaft über das Mineralöl oder den Gesichtspunkt ab, welches Verhalten die letzte Ursache für den Schadenseintritt gesetzt habe, sondern auf Zurechnungskriterien, die einen inneren Zusammenhang zwischen einer vorgelagerten Ursache und der Entstehung des Abfalls begründeten. Das Urteil des EuGH im Verfahren Commune de Mesquer setze diese Rechtsprechung fort. Der Gerichtshof führe aus, der Eigner eines Schweröl befördernden Schiffes, aus dem Teile des Öls bei einer Havarie ins Meer gelangten, sei Abfallerzeuger, weil er das Schweröl unmittelbar vor Umwandlung in Abfall (mit Sedimenten und Wasser vermischtes Öl) in Besitz gehabt habe. Ergänzend hebe der EuGH hervor, der Abfall könne auch durch das Verhalten des Schwerölverkäufers und Tankschiffbefrachters angefallen sein, wenn dieser zu der Gefahr der Verschmutzung, insbesondere durch Versäumung von Maßnahmen zur Verhinderung einer Havarie (z. B. sorgfältige Auswahl des Transportschiffes), beigetragen habe. Damit qualifiziere der EuGH eine

Person, die lediglich eine vorgelagerte Ursache gesetzt hat, ebenfalls als entsorgungspflichtigen Abfallerzeuger (BVerwG, Urt. v. 15.10.2014 – 7 C 1/13, juris Rn. 22).

Als Fazit hält das BVerwG in seinem Grundsatzurteil aus dem Jahr 2014 fest, dass das Unionsrecht zwar für den Regelfall von der Erzeugereigenschaft dessen ausgehe, der die Sachherrschaft über die zu Abfall gewordene Sache im Zeitpunkt der Abfallentstehung gehabt habe. Vorgelagertes Verhalten anderer Personen könne aber aufgrund von Zurechnungserwägungen, die an Risikosphären oder Fehlverhalten anknüpften, ebenfalls die Erzeugereigenschaft begründen. Ein solches Verständnis des Erzeugerbegriffs entspreche auch Sinn und Zweck der gesetzlichen Regelung. Das Ordnungsrecht werde beherrscht durch den Grundsatz effektiver Gefahrenabwehr. Wegen der ordnungsrechtlichen Prägung des Abfallrechts gelte dieser Grundsatz auch für dieses Rechtsgebiet. Die Auslegung des Erzeugerbegriffs sei deshalb am Ziel einer effektiven Entsorgung auszurichten. Das spreche dafür, ihn nicht zu eng auszulegen. Andererseits müsse eine Entgrenzung des Begriffs vermieden werden, die die Berechenbarkeit der Regelungen zur Bestimmung des Entsorgungspflichtigen in Frage stellen würde.

Neben dem Effektivitätsgrundsatz sei für eine am Normzweck ausgerichtete Auslegung das Verursacherprinzip von Bedeutung, das in den Gesetzesmaterialien ausdrücklich als Grund für die Inpflichtnahme des Abfallerzeugers genannt werde (BVerwG, Urt. v. 15.10.2014 – 7 C 1/13, juris Rn. 23 mit Verweis auf BT-Drs. 12/7284 S. 2). Die Verantwortung für die Beseitigung von Abfall solle nicht die Allgemeinheit, sondern den für die Entstehung maßgeblich Verantwortlichen treffen. Um Konturen des Begriffs Abfallerzeuger zu erhalten, müsse nach dem Grundsatz effektiver Gefahrenabwehr zwar daran festgehalten werden, dass grundsätzlich derjenige Abfallerzeuger sei, der als Inhaber der tatsächlichen Sachherrschaft die letzte Ursache für die Umwandlung einer Sache in Abfall gesetzt habe. Eine Ausnahme sei aber namentlich mit Blick auf das Verursacherprinzip geboten, wenn aufgrund besonderer Umstände bei wertender Betrachtung ein vorgelagertes Verhalten sich als wesentliche Ursache für die Abfallentstehung darstelle. Dies entspreche der im allgemeinen Ordnungsrecht anerkannten Auffassung, dass eine Person, die eine vorgelagerte Ursache gesetzt habe, ausnahmsweise verantwortlich sein könne, wenn ihre Handlung mit dem Verhalten desjenigen, der die letzte Ursache gesetzt habe, eine natürliche Einheit bilde und dieses objektiv veranlasst habe (BVerwG, Urt. v. 15.10.2014 – 7 C 1/13, juris Rn. 25; Beschl. v. 12.04.2006 -7 B 30.06, juris Rn. 4 m.w.N.; siehe dazu Frenz 2015, S. 135; Krahnefeld und Conzelmann 2014, S. 156).

7.3.2.1 Hersteller und Vertreiber von WEA

Auch auf Grundlage eines derart weiten Abfallerzeugerbegriffs dürften Hersteller und Vertreiber grundsätzlich von WEA bzw. von Rotorblättern nicht als Erzeuger der beim Rückbau der Demontage dieser Anlagen anfallenden Abfälle eingeordnet werden können. Der Abfallerzeugerbegriff würde jedenfalls konturenlos, wenn Warenproduzenten ohne Weiteres auch als Erzeuger von Abfällen eingeordnet würden, die bei der Verwirklichung eines Entledigungstatbestands nach dem Gebrauch oder Verbrauch der von ihnen produzierten Waren anfallen (so zu Recht Kropp 2015, S. 227). Dies widerspräche der Konzeption des KrWG, weil den Produzenten zwar eine Produktverantwortung (im EU-Recht als erweiterte Herstellerverantwortung bezeichnet), jedoch grds. keine Entsorgungspflicht trifft. Es müssen insoweit besondere Umstände dargelegt werden können, die es rechtfertigen, dass auch derjenige, der keine Sachherrschaft über den Abfall zum Zeitpunkt des Anfalls hat,

Abfallerzeuger ist. Wann in diesem Sinne besondere Umstände vorliegen, hat das BVerwG in seinem Grundsatzurteil aus dem Jahre 2014 nicht abschließend geklärt.

Anknüpfungspunkt für die Einordnung des Herstellers oder Vertreibers einer WEA als Abfallerzeuger des bei der Stilllegung und dem Rückbau der WEA anfallenden Abfalls könnte die von vornherein absehbar begrenzte Betriebs- oder Nutzungszeit der Anlage und die spezifische Gefahrenlage sein, die sich aus der Verwendung von Stoffen ergibt, deren Entsorgung besondere Probleme bereiten können.

Die nur begrenzte Betriebs- oder Nutzungsdauer der Anlage, die technisch oder wirtschaftlich begründet sein kann, ist aber kein besonderer Umstand, der eine solche Anlage von anderen Anlagen oder von anderen produzierten Maschinen oder Waren unterscheiden würde. Auch die Verwendung von Stoffen, die bei der Entsorgung spezifische Probleme bereiten, hier etwa der in Rede stehenden Carbon- und Glasfasern, ist kein besonderer Umstand einer WEA bzw. des Rotorblatts, weil auch in zahllosen anderen Produkten und Waren Gefahrstoffe, wassergefährdende Stoffe etc. verwendet werden.

Es ist deshalb nicht zu erwarten, dass Gerichte eine Inanspruchnahme des Herstellers einer WEA als Abfallerzeuger für die Entsorgung der Anlage oder von Teilen davon im Regelfall bestätigen würden. Etwas anderes kann im Einzelfall gelten, wenn Rotorblätter aufgrund konstruktsbedingter, vom Hersteller zu verantwortender Mängel vorzeitig demontiert und entsorgt werden müssen. Die Einführung einer Produktverantwortung der Hersteller und Vertreiber von WEA und speziell von Rotorblättern ist aber insoweit nicht schon deshalb entbehrlich, weil sie als Abfallerzeuger ohnehin schon entsorgungspflichtig wären. Für den Regelfall jedenfalls ist eine solche Entsorgungsverantwortung nach dem geltenden Recht nicht anzunehmen.

7.3.2.2 Beauftragte Unternehmen

Wird im Zuge des Rückbaus einer WEA ein Entsorgungsunternehmen oder ein Abbruchunternehmen beauftragt, dann stellt sich die Frage, ob auch das beauftragte Unternehmen betreiberunabhängige abfallrechtliche Pflichten hinsichtlich der Entsorgung der Rotorblätter treffen können. Das ist anzunehmen, wenn in einem solchen Fall das beauftragte Unternehmen gemäß § 3 Abs. 8 KrWG als Abfallerzeuger einzuordnen sein kann. Das Abbruch- oder Entsorgungsunternehmen ist Abfallerzeuger, wenn und soweit durch seine Tätigkeit Abfälle anfallen. Die Frage, wer in solchen Auftragsverhältnissen als Abfallerzeuger entsorgungspflichtig ist, ist umstritten (siehe dazu Müggenborg, 2016, § 13 KrWG Rn. 22; Frenz, 2015, S. 135; Kropp, 2015, S. 225). Die Gerichte und die Literatur gehen überwiegend von der Erzeugerstellung des Auftraggebers aus, d. h. im vorliegenden Zusammenhang des Betreibers der WEA (siehe dazu Kropp, 2015, S. 229). Eine Einbeziehung von auftrags- und weisungsabhängigen Personen in den Abfallerzeugerbegriff und die dadurch begründete Verantwortlichkeit laufe der Zielrichtung des Verursacherdenkens zuwider. Wie in anderen Rechtsbereichen auch komme es nicht allein darauf an, wer die Tätigkeit körperlich ausführe, sondern auch, wem sie wirtschaftlich und sozial zuzurechnen sei (Kropp, 2015, S. 229). Auch ein Bau- oder Abbruchunternehmen handele nicht eigenständig, sondern für einen anderen, nämlich für den Auftraggeber. Bei wertender Betrachtung bewirke letztlich dieser den Abfallanfall. Denn er treffe die Entscheidung, dass das Gebäude (oder die Anlage) abgerissen werden solle. Damit entscheide der Auftraggeber, dass Abfall entstehen solle. Er sei derjenige,

der durch sein Handeln bzw. Beauftragen im Sinne einer Conditio-sine-qua-non den Abfall schaffe (Versteyl 2007, S. 138; Kropp 2015, S. 229).

Beauftragte Entsorgungsunternehmen können aber als Abfallbesitzer im Sinne von § 3 Abs. 9 KrWG entsorgungspflichtig sein. Regelmäßig erlangt der selbstständige Abfalltransporteur mit der Übernahme des Abfalls abfallrechtlichen Besitz (Dieckmann und Hurst 2014, § 3 KrWG Rn. 184; OLG Naumburg, Urt. v. 22.06.00 - 7 U (Hs) 64/99, NVwZ 2002, 251). Dasselbe gilt für den Betreiber einer Entsorgungsanlage, der den Abfall vom Abfallerzeuger übernimmt. Selbstständige Transporteure und Anlagenbetreiber handeln zwar möglicherweise im Rahmen eines werkvertraglichen Auftragsverhältnisses. Sie haben aber gleichwohl bei der selbstständigen Erfüllung der mit ihrer Tätigkeit verbundenen Aufgaben und Rechtspflichten die für den Abfallbesitz notwendige Sachherrschaft. Die Entsorgungspflicht des beauftragten Entsorgungsunternehmens bzw. des Beförderungsunternehmens als Abfallbesitzer setzt allerdings voraus, dass sie die Abfälle auch schon in den Besitz übernommen haben.

Für den Fall, dass der Betreiber der WEA insolvent geworden ist und die von ihm erbrachte Sicherheitsleistung nicht ausreicht, kann insoweit auch der von ihm beauftragte Entsorgungsunternehmer für die Entsorgung der noch an dem Betriebsstandort vorhandenen Abbruchabfälle nicht ordnungsrechtlich in Anspruch genommen werden. Hat das beauftragte Unternehmen die Rotorblätter nach deren Demontage jedoch zur Entsorgung übernommen, bleibt es für die Entsorgung auch dann verantwortlich, wenn der Auftraggeber, d. h. der Betreiber der WEA, insolvent wird.

7.3.3 Verhaltens- und Zustandsverantwortung nach BBodSchG

Nach § 4 Abs. 3 S. 1 BBodSchG ist der Verursacher einer schädlichen Bodenveränderung neben dem nach § 4 Abs. 2 BBodSchG verantwortlichen Grundstückseigentümer verpflichtet, den Boden zu sanieren, sodass dauerhaft keine Gefahren, erhebliche Nachteile oder erhebliche Belästigungen entstehen. Voraussetzung für eine Verantwortung nach dem BBodSchG ist es allerdings, dass eine WEA, deren Betrieb dauerhaft eingestellt worden ist, als schädliche Bodenveränderung einzuordnen ist, dass dementsprechend Bodenfunktionen beeinträchtigt werden (siehe dazu bereits oben). Eine schädliche Bodenveränderung kann zwar von der WEA ausgehen. Das betrifft aber – wie schon erwähnt – mehr das Fundament der WEA oder die Bodenverdichtung im Zusammenhang mit dem Rückbau der WEA. Bei der Entsorgung von Rotorblattabfällen dürfte es jedoch nicht um eine Bodensanierung nach dem Bodenschutzrecht, sondern um eine Abfallentsorgung nach dem KrWG gehen. Wenn allerdings im Rahmen der Demontage Schadstoffe in den Boden gelangen (z. B. beim Zersägen anfallende Stäube, die bei fehlender Einhausung und Absaugung emittiert werden), kann dies zu einer schädlichen Bodenveränderung führen, die auf der Grundlage des BBodSchG zu sanieren bzw. die vorsorglich zu vermeiden ist.

Da es sich bei den meisten WEA um immissionsschutzrechtlich genehmigungsbedürftige Anlagen handelt, ist zu beachten, dass im Anwendungsbereich des § 5 BImSchG die Pflichten des BBodSchG gem. § 3 Abs.1 BBodSchG verdrängt werden. Schädliche Bodenveränderungen i. S. d. § 2 Abs.2 BBodSchG, die über Luftverunreinigungen erfolgen, sind gem. § 3 Abs.3 S.1 BBodSchG schädliche Umwelteinwirkungen (Immissionen) i. S. d. BImSchG, mit allen Folgen, die das BImSchG an diesen Tatbestand knüpft. Entsprechendes gilt für schädliche Bodenverunreinigungen, die auf andere Weise, insbesondere direkt vorgenommen werden; sie sind gem. § 3 Abs.3 S.1 BBodSchG sonstige Einwirkungen, also sonstige Gefahren, erhebliche

Nachteile und erhebliche Belästigungen i. S. d. § 5 Abs.1 Nr.1 BImSchG einzuordnen. Maßnahmen des Bodenschutzes müssten insoweit von der für die immissionsschutzrechtliche Genehmigung und Überwachung zuständigen Behörde nach § 17 BImSchG angeordnet werden.

7.4 Genehmigungspflichtigkeit des Rückbaus

Soweit der Rückbau einer WEA und die Demontage der Rotorblätter nicht in der immissionsschutzrechtlichen Genehmigung bzw. in einer nachträglichen Anordnung dazu oder in der Baugenehmigung geregelt worden sind, stellt sich die Frage, ob und inwieweit der Rückbau der Anlage und die Art und Weise der Demontage der Rotorblätter vor Ort genehmigungspflichtig sind. Genehmigungspflichten zählen zu den wichtigsten behördlichen Überwachungsinstrumenten. Besteht eine umfassende oder weitreichende Genehmigungspflicht, wäre dies ein Gesichtspunkt, dem eine Einführung zusätzlicher behördlicher Überwachungsinstrumente, etwa durch zusätzliche Nachweispflichten, entgegenstehen könnte.

7.4.1 Immissionsschutzrechtliche Genehmigung der Abfallbehandlung

Die Stilllegung einer WEA bedarf nach § 15 Abs. 3 S. 1 BImSchG einer Anzeige, jedoch keiner immissionsschutzrechtlichen Genehmigung. Nötigenfalls kann die zuständige Behörde Anordnungen nach § 17 Abs. 4 a S. 1 BImSchG zur Durchsetzung der Nachsorgepflichten nach § 5 Abs. 3 BImSchG treffen.

Eine Zerkleinerung der Rotorblätteranlagen und eine Sortierung von Fraktionen der zerkleinerten Rotorblätter vor Ort, d. h. am Betriebsstandort der stillgelegten WEA, könnte aber grundsätzlich auch zu einer immissionsschutzrechtlichen Genehmigungspflicht für eine Abfallbehandlungsanlage führen. Nach § 35 Abs. 1 KrWG ist die Errichtung und der Betrieb von Anlagen, in denen eine Entsorgung von Abfällen durchgeführt wird, immissionsschutzrechtlich genehmigungsbedürftig. Unter einer Behandlung in diesem Sinne versteht man jede qualitative oder quantitative Veränderung der Beschaffenheit oder der Zusammensetzung von Abfällen. Dazu gehört auch das Zerkleinern von Abfällen. Für den Anlagenbegriff des KrWG und des Immissionsschutzrechts kommt es nicht darauf an, dass bestimmte bauliche oder technische Anlagen vorhanden sind. Es gilt vielmehr ein weiter Anlagenbegriff. Grundsätzlich können auch Grundstücke, auf denen Abfälle behandelt werden, als Anlage in diesem Sinne anzusehen sein.

Gem. § 1 Abs.1 S.1 der 4.BImSchV ist eine Anlage aber nur dann genehmigungsbedürftig, wenn nach den objektiven Umständen zu erwarten ist, dass sie länger als zwölf Monate am gleichen Ort betrieben wird. Keine Anwendung findet die Einschränkung der Genehmigungspflicht durch die 12-Monats-Frist gem. § 1 Abs.1 S. 2 der 4.BImSchV bei den in Nr.8 Anh.1 zur 4.BImSchV aufgeführten Anlagen zur Verwertung und Beseitigung von Abfällen und sonstigen Stoffen, sofern sie sich nicht am Ort des Entstehens der Abfälle befinden. Dazu gehören etwa mobile Brechanlagen zur Zerkleinerung der auf einem Abbruchgelände anfallenden Bauabfälle oder mobile Bodenreinigungsanlagen zur Behandlung des auf dem Einsatzgelände ausgekofferten verunreinigten Bodenmaterials. Solche Anlagen können daher auch bei kurzer Betriebsdauer genehmigungsbedürftig sein (Jarass, 2020, BImSchG § 4 Rn. 32). Wenn die Rotorblätter am Ort ihrer Demontage noch zerkleinert werden, bedarf es insoweit keiner gesonderten immissionsschutzrechtlichen Genehmigung, weil diese Zerkleinerung am Ort des Anfalls der Rotorblattabfälle unmittelbar durchgeführt wird.

Für den Rückbau einer WEA im Rahmen eines Repowering ist außerdem § 16 b BImSchG zu beachten. Wird eine Anlage zur Erzeugung von Strom aus erneuerbaren Energien modernisiert, was der Gesetzgeber als „Repowering“ legaldefiniert, bedarf es eines Änderungsgenehmigungsverfahrens nach § 16 BImSchG. In diesem Verfahren müssen auf Antrag des Vorhabenträgers nur Anforderungen geprüft werden, soweit durch das Repowering im Verhältnis zum gegenwärtigen Zustand unter Berücksichtigung der auszutauschenden Anlage nachteilige Auswirkungen hervorgerufen werden und diese für die Prüfung nach § 6 BImSchG erheblich sein können. Die vom Gesetzgeber als Repowering bezeichnete Modernisierung umfasst nach § 16 Abs. 2 S. 1 BImSchG den vollständigen oder teilweisen Austausch von Anlagen oder Betriebssystemen und -geräten zum Austausch von Kapazität oder zur Steigerung der Effizienz oder der Kapazität der Anlage. Bei einem vollständigen Austausch der Anlage sind nach § 16 Abs. 2 S. 2 BImSchG zusätzlich folgende Anforderungen einzuhalten: 1. Die neue Anlage wird innerhalb von 24 Monaten nach dem Rückbau der Bestandsanlage errichtet und 2. der Abstand zwischen der Bestandsanlage und der neuen Anlage beträgt höchstens das Zweifache der Gesamthöhe der neuen Anlage. In einem solchen Änderungsgenehmigungsverfahren für ein Repowering sind auch die Umweltauswirkungen der beim Rückbau der zu ersetzenden WEA anfallenden Abfälle zu berücksichtigen.

7.4.2 Baugenehmigungspflicht des Rückbaus

Aus der jeweiligen Landesbauordnung ergibt sich, ob und inwieweit für den Abbruch und den Rückbau der WEA eine gesonderte Baugenehmigung notwendig wird. Die bauordnungsrechtliche Genehmigungsbedürftigkeit wurde in den vergangenen Jahren von den Bundesländern zunehmend zurückgenommen. Ganz überwiegend sehen die Landesbauordnungen keine Genehmigung, aber eine Anzeigepflicht vor, wobei der Abbruch der WEA erst nach Verstreichen einer Frist nach der Eingangsbestätigung durch Bauaufsichtsbehörde beginnen darf. Auf der Grundlage einer solchen Anzeige kann die zuständige Behörde nötigenfalls ordnungsrechtlich tätig werden, wenn sie die Gefahr erkennt, dass der geplante Rückbau der WEA nicht den gesetzlichen Anforderungen genügt. Sinnvoll ist es, den Betreiber der WEA zu verpflichten, seiner Anzeige des Rückbaus Unterlagen und Informationen über sein Rückbaukonzept beizufügen, aus dem sich u. a. auch die beabsichtigte Verwendung bzw. Entsorgung der Rotorblätter ergibt. Ein baurechtliches Genehmigungserfordernis für den Rückbau bedarf es nicht.

7.4.3 Genehmigung eines Eingriffs in Natur und Landschaft

Führen der Rückbau und die Demontage der Rotorblätter zu einem Eingriff in Natur und Landschaft, dann kann auch dieser Eingriff naturschutzrechtlich genehmigungspflichtig sein. Für einen Eingriff, der nicht von einer Behörde durchgeführt wird und der keiner behördlichen Zulassung oder Anzeige nach anderen Rechtsvorschriften bedarf, ist gem. § 17 Abs. 3 S. 1 Gesetz über Naturschutz und Landschaftspflege 29.07.2009 eine Genehmigung der für Naturschutz und Landschaftspflege zuständigen Behörde erforderlich. Die Genehmigung ist § 17 Abs. 3 S. 2 BNatSchG schriftlich zu beantragen. Die Genehmigung ist § 17 Abs. 3 S. 3 BNatSchG zu erteilen, wenn die Anforderungen des § 15 BNatSchG erfüllt sind.

Eingriffe in Natur und Landschaft sind nach § 14 Abs. 1 BNatSchG Veränderungen der Gestalt oder Nutzung von Grundflächen oder Veränderungen des mit der belebten Bodenschicht in Verbindung stehenden Grundwasserspiegels, die die Leistungs- und Funktionsfähigkeit des Naturhaushalts oder das Landschaftsbild erheblich beeinträchtigen können. In diesem Sinne

dürfte der Rückbau von WEA, insbesondere die Demontage von Rotorblättern am Betriebsstandort regelmäßig nicht zu einem Eingriff in Natur und Landschaft führen (allgemein zur Eingriffsregelung bei WEA siehe Fülbier 2017, S. 804). Wenn allerdings für den Rückbau Freiflächen erst noch oder wieder geschaffen werden müssen, wenn vorhandener Bewuchs beseitigt werden muss, wenn Zufahrtsschneisen freigeschnitten werden müssen, wenn Zwischenlagerflächen eingerichtet werden müssen, etc., dann kann mit dem Rückbau auch ein Eingriff in Natur und Landschaft verbunden sein.

Eingriffe in Natur und Landschaft sind auch Veränderungen des mit der belebten Bodenschicht in Verbindung stehenden Grundwasserspiegels. Stoffliche Einträge in das Grundwasser sind hingegen nicht vom Eingriffsbegriff umfasst (Gellermann 2017 2017, § 14 BNatSchG Rn. 10).

7.4.4 Waldumwandlungsgenehmigung

Nach der Rechtsprechung sind Waldflächen grundsätzlich keine harten Tabuzonen (OVG NRW, Urt. v. 10.05.2021 – 2 D 100/19.NE, juris Rn. 118; Urt. v. 22.09.2015 - 10 D 82/13.NE, ZfBR 2016, 52; v. 06.10.2017- 7 D 100/15.NE, BauR 2018, 468; v. 06.03.2018 - 2 D 95/15.NE, DVBl. 2018, 950; Thür. OVG, Urt. v. 08.04.2014 - 1 N 676/12, juris Rn. 93; OVG BB, Urt. v. 24.02.2011 - 2 A 2.09, NuR 2011, 794; Nds. OVG, Urt. v. 23.01.2014 - 12 KN 285/12, juris Rn. 19, v.14.05.2014 - 12 KN 29/13, NuR 2014, 654). Bei den harten Tabuzonen handelt es sich nach der Rechtsprechung des BVerwG um Flächen, deren Bereitstellung für die Windenergienutzung an § 1 Abs. 3 S. 1 BauGB scheitert (BVerwG, Urt. v. 13.12.2012 – 4 CN 1.11, NVwZ 2013, 519). Danach haben die Gemeinden die Bauleitpläne aufzustellen, sobald und soweit es für die städtebauliche Entwicklung und Ordnung erforderlich ist. Nicht erforderlich ist ein Bauleitplan, wenn seiner Verwirklichung auf unabsehbare Zeit rechtliche oder tatsächliche Hindernisse im Wege stehen (BVerwG, Urt. v. 18.3.2004 – 4 CN 4.03, NVwZ 2004, 856). Nach dem Forstrecht ist es nicht möglich, WEA im Wald ohne vorherige Waldumwandlungsgenehmigung zu errichten. Das Forstrecht eröffnet jedoch mit der Waldumwandlung die Möglichkeit, den Standort der WEA aus dem Forstrecht zu entlassen. Wenn die zuständige Forstbehörde im Verfahren zur Aufstellung eines Flächennutzungsplans eine Waldumwandlung für bestimmte Waldbereiche in Aussicht stellt, ist es der Gemeinde grundsätzlich möglich, eine Konzentrationszone für Windenergie auch im Wald darzustellen. Die Nachnutzung des forstrechtlich umgewandelten Betriebsgrundstücks der WEA kann wiederum einer forstrechtlichen Genehmigung bedürfen. Insoweit kann beim Rückbau einer WEA auch eine forstrechtliche Genehmigung erforderlich werden. Gegenstand dieser forstrechtlichen Genehmigung dürfte allerdings nur die geplante Nachnutzung des ehemaligen Waldgrundstücks nach Stilllegung der WEA und nicht die Entsorgung der Rotorblattabfälle sein; dies gilt jedenfalls solange nicht eine Zwischenlagerung der Rotorblattabfälle am Betriebsstandort geplant ist.

7.4.5 Wasserrechtlich genehmigungsbedürftige Benutzungstatbestände

Grundsätzlich ist es auch nicht von vornherein auszuschließen, dass eine Zerkleinerung von Rotorblättern am Standort der demontierten WEA wasserrechtlich erlaubnisbedürftig ist. Nach § 9 Abs. 1 Nr. 4 WHG ist das Einbringen von Stoffen in ein Gewässer eine grundsätzlich erlaubnispflichtige Gewässerbenutzung. Nach § 9 Abs. 2 Nr. 2 WHG sind darüber hinaus Maßnahmen, die geeignet sind, dauernd oder in einem nicht nur unerheblichen Ausmaß nachteilige Veränderungen der Wasserbeschaffenheit herbeizuführen, eine unechte Gewässerbenutzung, die ebenfalls erlaubnispflichtig ist. Lässt sich durch technische Maßnahmen beim Rückbau nicht zuverlässig ausschließen, dass wassergefährdende Stoffe in ein Gewässer

eingebracht oder dass nachteilige Veränderungen der Wasserbeschaffenheit eintreten, dann kann ein solcher Rückbau auch wasserrechtlich erlaubnispflichtig sein.

7.4.6 Zwischenergebnis

Für die Stilllegung und en Rückbau einer WEA ist ganz überwiegend eine Anzeige nach Immissionsschutzrecht des Bundes und nach dem Bauordnungsrecht der Länder vorgesehen. Je nach der örtlichen Situation und der Art und Weise des Rückbaus können jedoch Genehmigungserfordernisse nach dem Naturschutzrecht, dem Forstrecht und dem Wasserrecht und für den Abtransport rückgebauter Anlagenteile auch nach dem Beförderungsrecht bestehen. Für den Rückbau einer Anlage im Rahmen des Repowering bedarf es eines immissionsschutzrechtlichen Änderungsgenehmigungsverfahrens nach § 16 b BImSchG. Dass es darüber hinaus für einen geordneten Rückbau und insbesondere für die Entsorgung der Rotorblätter notwendig wäre, eine generelle Genehmigungspflicht einzuführen, ist nicht ersichtlich.

7.5 Materiell-rechtliche Anforderungen an die Entsorgung von Rotorblättern

Materiell-rechtliche Anforderungen an die Entsorgung von Rotorblättern ergeben sich in erster Linie aus dem KrWG, das aber mit seinem Gebot zur ordnungsgemäßen Verwertung im Sinne von § 7 Abs. 3 S, 2, 3 KrWG auf sämtliche einschlägige Vorschriften des öffentlichen Rechts und damit insbesondere auch auf Vorschriften des Immissionsschutzrechts, des Naturschutzrechts, des Wasserrechts und des Baurechts verweist. Für die Frage, welche rechtlichen Anforderungen an die Entsorgung von Rotorblättern zu stellen sind, kommt es aber entscheidend im ersten Schritt darauf an, ob der in § 13 KrWG geregelte Anwendungsvorrang für das Immissionsschutzrecht dazu führt, dass die Vorschriften des KrWG für die Betreiber von immissionsschutzrechtlich genehmigten WEA bei deren Rückbau und Demontage nicht anzuwenden sind und dass insoweit die Vorschriften des BImSchG vorrangig sind. Gegen einen aus § 13 KrWG abgeleiteten Anwendungsvorrang des BImSchG für die bei dem Rückbau der WEA und der Demontage der Rotorblätter anfallenden Abfälle spricht, dass sich § 13 KrWG auf die Pflichten der Anlagenbetreiber im Zusammenhang mit der Errichtung und dem Betrieb der immissionsschutzrechtlich genehmigungsbedürftigen und nicht genehmigungsbedürftigen Anlagen, jedoch nicht auf Abfälle, die nach Einstellung des Betriebs der Anlage anfallen, bezieht (Beckmann 2021, 2021, § 13 KrWG Rn. 27; Beckmann 2014, S. 194; Jarass, 2020, § 5 BImSchG Rn. 77 a; Petersen, 2014, § 13 KrWG Rn. 22, 40).

Selbst wenn von einem durch § 13 KrWG vorgeschriebenen Anwendungsvorrang des BImSchG auszugehen wäre, bliebe es für die immissionsschutzrechtlich genehmigungsbedürftigen WEA bei der Anwendbarkeit auch der Vorschriften des KrWG. Denn nach § 5 Abs. 3 Nr. 2 BImSchG sind genehmigungsbedürftige Anlagen so zu errichten, zu betreiben und stillzulegen, dass auch nach einer Betriebseinstellung vorhandene Abfälle ordnungsgemäß und schadlos verwertet oder ohne Beeinträchtigung des Wohls der Allgemeinheit beseitigt werden. Damit ist trotz des Verweises auf die Vorschriften des BImSchG für den Bereich der Verwertung und der Beseitigung von Abfällen aus immissionsschutzrechtlich genehmigungsbedürftigen Anlagen der Vorrang des KrWG wiederhergestellt. Die immissionsschutzrechtlichen Entsorgungspflichten folgen der Systematik und den zentralen Rechtsbegriffen des KrWG. Sie werden insoweit vom Kreislaufwirtschaftsrecht determiniert (Beckmann, 2021, § 13 KrWG Rn. 27; Petersen, 2014, § 13 KrWG Rn. 2; Jarass, 2020, § 5 BImSchG Rn. 85; Müggenborg, 2016, § 13 KrWG Rn. 19).

Die anlagenbezogene Verwertungs- und Beseitigungspflicht wird insoweit zwar über das immissionsschutzrechtliche Instrumentarium durchgesetzt, insbesondere über die Genehmigungspflichten nach den §§ 6, 16, 16a BImSchG und über nachträgliche Maßnahmen nach §§ 17, 20 und § 21 BImSchG, § 48 VwVfG). Die materiell-rechtlichen Anforderungen an die Entsorgung ergeben sich jedoch aus dem KrWG (Jarass, 2020, § 5 Rn. 85).

Für die immissionsschutzrechtlich nicht genehmigungsbedürftigen WEA gilt § 22 Abs. 1 S. 1 Nr. 3 BImSchG. Danach sind WEA so zu errichten und zu betreiben, dass die beim Betrieb der Anlagen entstehenden Abfälle ordnungsgemäß beseitigt werden können. Eine Regelung zur Entsorgung und insbesondere zur Verwertung der nach dem Betrieb der WEA anfallenden Abfälle enthält § 22 Abs. 1 S. 1 Nr. 3 BImSchG nicht. Die Vorschriften des KrWG zur Vermeidung und Verwertung von Abfällen werden durch § 22 Abs. 1 S. 1 Nr. 3 BImSchG unabhängig davon nicht verdrängt, sofern sich daraus weitergehende Anforderungen ergeben (Jarass, BImSchG, 2020, § 22 Rn. 21). Auch § 13 KrWG schließt eine Anwendung der Vorgaben des KrWG zur Vermeidung und Verwertung nicht aus (BT-Drs.12/7284, S.15; Petersen, 2014, § 13 KrWG Rn.46; Jarass, 2020, § 22 BImSchG Rn. 21), da der dort statuierte Vorrang des Immissionsschutzrechts nur dann zum Tragen kommt, wenn das Immissionsschutzrecht sachliche Regelungen enthält (Petersen, KrWG, 2014, § 13 Rn.46). Dies ist bei nicht genehmigungsbedürftigen Anlagen weder hinsichtlich der Abfallvermeidung noch hinsichtlich der Abfallverwertung der Fall (Jarass, 2020, § 22 BImSchG Rn. 68).

Ausgangspunkt der rechtlichen Anforderungen an die Entsorgung von Rotorblättern ist damit das KrWG.

7.5.1 Grundpflichten der Kreislaufwirtschaft (§ 7 KrWG)

Die Erzeuger oder Besitzer von Abfällen sind nach § 7 Abs. 2 S. 1 KrWG zur Verwertung ihrer Abfälle verpflichtet. Die Verwertung von Abfällen hat nach § 7 Abs. 2 S. 2 KrWG Vorrang vor deren Beseitigung. Der Vorrang entfällt nach § 7 Abs. 2 S. 3 KrWG, wenn die Beseitigung der Abfälle den Schutz von Mensch und Umwelt nach Maßgabe des § 6 Abs. 2 Satz 2 und 3 KrWG am besten gewährleistet. Die Verwertung von Abfällen, insbesondere durch ihre Einbindung in Erzeugnisse, hat gem. § 7 Abs. 3 S. 1 KrWG ordnungsgemäß und schadlos zu erfolgen.

7.5.1.1 Ordnungsgemäßheit der Entsorgung

Die Verwertung ist nach § 7 Abs. 3 S. 2 KrWG ordnungsgemäß, wenn sie im Einklang mit den Vorschriften des KrWG und anderen öffentlich-rechtlichen Vorschriften steht. Zu beachten ist bei der Entsorgung der Rotorblätter, beginnend mit ihrer Demontage und Zerlegung am Standort der WEA, über den Transport bzw. einem Zwischenlager bzw. bis zu einer evtl. Vorbehandlung bis zum Ort der Endentsorgung, insoweit das insgesamt einschlägige öffentliche Recht. Dazu zählen u. a. Vorschriften des Immissionsschutzrechts zu Lärm und Luftverunreinigungen, des Chemikalien- und Gefahrstoffrechts, des Wasserrechts, des Naturschutzrechts und des Bodenschutzrechts.

7.5.1.1.1 Ende der Entsorgungspflicht

Wann die Entsorgung der Rotorblätter endgültig abgeschlossen ist und damit auch der zeitliche Anwendungsbereich des KrWG endet und die Entsorgungsverantwortung der Anlagenbetreiber entfällt, kann im Einzelfall schwierig zu bestimmen sein. Sicher endet die Entsorgungsverantwortung mit dem Ende der Abfalleigenschaft. Nach § 5 Abs. 1 KrWG endet die

Abfalleigenschaft eines Stoffes oder Gegenstandes, wenn dieser ein Verwertungsverfahren durchlaufen hat und so beschaffen ist, dass er üblicherweise für bestimmte Zwecke verwendet wird, ein Markt für ihn oder eine Nachfrage nach ihm besteht, er alle für seine jeweilige Zweckbestimmung geltenden technischen Anforderungen sowie alle Rechtsvorschriften und anwendbaren Normen für Erzeugnisse erfüllt sowie seine Verwendung insgesamt nicht zu schädlichen Auswirkungen auf Mensch und Umwelt führt. Unabhängig davon kann die Entsorgungsverantwortung auch dann enden, wenn der Abfall nach Durchlaufen des Verwertungsverfahrens untergeht, weil er entweder verbraucht worden ist (z. B. bei der energetischen Verwertung) oder weil er z. B. als Baustoff ordnungsgemäß in einem Bauwerk eingebaut worden ist (Beckmann, 2021, § 22 KrWG Rn. 35).

Der Zeitpunkt, zu dem die Entsorgungspflichten des Betreibers einer WEA für die Rotorblätter enden, hängt davon ab, welcher Entsorgungsweg für die Rotorblätter bzw. einzelne Teile oder Fraktionen von ihnen vorgesehen ist. Die Entsorgungspflicht des Betreibers der WEA endet nicht schon mit der Beauftragung eines Unternehmens mit der Entsorgung der Rotorblätter und auch nicht mit der Übergabe der demontierten Rotorblätter an einen Entsorgungsfachbetrieb. Nach § 22 S. 2 KrWG bleibt die Verantwortlichkeit für die Erfüllung der Pflichten so lange bestehen, bis die Entsorgung endgültig und ordnungsgemäß abgeschlossen ist. Es muss deshalb für die einzelnen Fraktionen (Metalle, Altholz, Schäume, Lacke, Beschichtungen, GFK-haltige und CFK-haltige Abfälle) festgestellt werden, ob ihre Entsorgung endgültig und ordnungsgemäß abgeschlossen ist.

7.5.1.1.2 Vorsorge gegen schädliche Bodenveränderungen

Betreiber von WEA, Grundstückseigentümer, der Inhaber der tatsächlichen Gewalt über ein Grundstück und derjenige, der Verrichtungen auf einem Grundstück durchführt oder durchführen lässt, die zu Veränderungen der Bodenbeschaffenheit führen können, sind nach § 7 S. 1 BBodSchG verpflichtet, Vorsorge gegen das Entstehen schädlicher Bodenveränderungen zu treffen, die durch ihre Nutzung auf dem Grundstück oder in dessen Einwirkungsbereich hervorgerufen werden können. Vorsorgemaßnahmen sind nach § 7 S. 2 BBodSchG geboten, wenn wegen der räumlichen, langfristigen oder komplexen Auswirkungen einer Nutzung auf die Bodenfunktionen die Besorgnis einer schädlichen Bodenveränderung besteht. Zur Erfüllung der Vorsorgepflicht sind Bodeneinwirkungen gem. § 7 S. 3 BBodSchG zu vermeiden oder zu vermindern, soweit dies auch im Hinblick auf den Zweck der Nutzung des Grundstücks verhältnismäßig ist.

Für die Zeit des Rückbaus hat die Bodenschutzbehörde dafür Sorge zu tragen, dass eine uneingeschränkte Folgenutzung und eine weitgehende Wiederherstellung der Bodenfunktionen gemäß § 2 Abs. 2 BBodSchG sichergestellt werden.

Schädliche Bodenveränderungen sind Beeinträchtigungen der Bodenfunktionen, die geeignet sind, Gefahren, erhebliche Nachteile oder erhebliche Belästigungen für den Einzelnen oder die Allgemeinheit herbeizuführen (§ 2 Abs. 3 BBodSchG). Die natürlichen Funktionen des Bodens umfassen neben anderen die Funktion als Bestandteil des Naturhaushalts, insbesondere mit seinen Wasser- und Nährstoffkreisläufen (§ 2 Abs. 2 Nr. 1b BBodSchG). Bezogen auf den Wasserkreislauf besitzt der Boden unter anderem die Fähigkeit, Niederschlagswasser aufzunehmen und es als Sickerwasser nach der Bodenpassage an das Grundwasser und/oder die Oberflächengewässer abzugeben; er schützt zugleich das Grundwasser und die Oberflächengewässer vor Schadstoffeinträgen (§ 2 Abs. 2 Nr. 1c BBodSchG). Diese Funktion ist

beeinträchtigt, wenn in dem Boden Stoffe sind, die in den Wasserkreislauf gelangen und geeignet sind, dort Gefahren oder erhebliche Nachteile zu bewirken (VG Lüneburg, Urt. v. 24.11.2016 – 2 A 7/15, juris Rn. 40).

Die Eignung besteht, wenn im Hinblick auf den Wasserhaushalt nachteilige Auswirkungen einer gewissen Mindestintensität hinreichend wahrscheinlich sind. Der erforderliche Grad an Wahrscheinlichkeit bestimmt sich nach Art und Ausmaß des drohenden Schadens einerseits und des hohen Schutzes, den die Gewässer genießen, andererseits. Ein hinreichender Grad an Wahrscheinlichkeit ist insbesondere bei Substanzen im Boden gegeben, die mit durchsickerndem Niederschlagswasser in das Grundwasser oder die Oberflächengewässer transportiert werden und nach Art sowie Konzentration eine nachteilige Veränderung der Gewässereigenschaften hervorrufen (vgl. § 5 Abs. 1 Nr. 1 WHG). Eine zum behördlichen Tätigwerden ermächtigende Beeinträchtigung der Wassergüte liegt insofern nicht erst dann vor, wenn feststeht, dass die bewirkten Veränderungen allgemein und/oder im Besonderen hinsichtlich der Trinkwasserversorgung den Ge- oder Verbrauchswert des Wassers aufheben oder wesentlich herabsetzen. Vielmehr reicht angesichts der zentralen Bedeutung der Erhaltung und des Schutzes der naturgegebenen Wasservorkommen, vor allem der als Ausgangsstoff für die Trinkwasserversorgung nutzbaren und genutzten Wasservorkommen, selbst ein nur geringer Grad an Wahrscheinlichkeit der nachteiligen Beeinflussung der Nutzbarkeit des Wassers zu diesen Zwecken aus. Nichts anderes gilt im Hinblick auf den Schutz der ökologischen Funktionen der Gewässer (vgl. § 1 WHG). Es ist gerade Sinn und Zweck des Schutzes des Bodens, soweit er für den Wasserhaushalt relevant ist, die Gewässer vor Stoffen zu bewahren, die sich nach den Maßstäben des Wasserrechts und den Vorgaben des Trinkwasserschutzes potentiell nachteilig auf den Ge- oder Verbrauchswert der Gewässer auswirken können (VG Lüneburg, Urt. v. 24.11.2016 – 2 A 7/15, juris Rn. 40; OVG NRW, Urt. v. 20.05.2015 – 16 A 1686/09, juris; Sondermann und Hejma 2005, § 9 BBodSchG Rn. 29 ff.).

Konkrete Anhaltspunkte, die den hinreichenden Verdacht einer schädlichen Bodenveränderung oder Altlast i.S.v. § 9 Abs. 2 Satz 1 BBodSchG begründen, liegen gem. § 3 Abs. 4 BBodSchV regelmäßig dann vor, wenn Untersuchungen eine Überschreitung von Prüfwerten ergeben oder wenn aufgrund einer Bewertung nach § 4 Abs. 3 BBodSchV eine Überschreitung von Prüfwerten zu erwarten ist (VGH BW, Urt. v. 18.12.2012 – 10 S 744/12, juris). Einträge von Schadstoffen im Sinne des § 9 Abs. 1 S. 1 Nr. 2 BBodSchV, für die keine Vorsorgewerte festgesetzt sind, sind nach Maßgabe von § 9 Abs. 1 BBodSchV soweit technisch möglich und wirtschaftlich vertretbar zu begrenzen. Dies gilt insbesondere für die Stoffe, die nach der Gefahrstoffverordnung als krebserzeugend, erbgutverändernd oder fortpflanzungsgefährdend eingestuft sind. Bodenschutzrechtlich problematisch sind ausweislich des LABO-Leitfadens „Anforderungen des Bodenschutzes an den Rückbau von WEA“, 2021, S. 21, bei der Zerkleinerung der Rotorblätter vor Ort das Entstehen von Splittern, die Emission von Stäuben und das Anfallen von GFK- oder CFK-Abfällen, da diese als Fremdstoffe in den Boden eingetragen werden können.

Spezifische bodenschutzrelevante Probleme der Bodenverdichtung dürften sich in aller Regel bei der Demontage der Rotorblätter nicht stellen, wenn für die Demontage und den Abtransport der Rotorblätter die für den Bau der WEA ohnehin befestigten Flächen genutzt werden. Der LABO-Leitfaden „Anforderungen des Bodenschutzes an den Rückbau von WEA, 2021, S. 27, weist aber ausdrücklich daraufaufgefahren hin, die sich beim Rückbau durch eine Verdichtung von Böden und die daraus resultierende Vernässung ergeben können. Das gilt insbesondere dann, wenn bei der Zerkleinerung der Rotorblätter vor Ort ein größerer Flächenbedarf entsteht,

für den mit bodenschutzrelevanten Verdichtungen zu rechnen ist. Ein größerer Flächenbedarf könnte bei der Demontage auch notwendig werden, wenn nicht einzelne Rotorblätter, sondern die gesamte Rotorblattkonstruktion bei kleineren WEA an einem Stück abgenommen werden soll. Der LABO-Leitfaden empfiehlt, die Flächeninanspruchnahme beim Rückbau auf das nötigste zu beschränken. Für die für den Rückbau zusätzlich zur schon vorhandenen Infrastruktur in Anspruch genommenen Flächen müssten Schutzmaßnahmen ergriffen werden, um die Böden vor Verdichtungen, Vernässungen, vor Stoffeinträgen, Verschmutzung und Erosion zu schützen. Dabei handelt es sich allerdings um ein generelleres, den Rückbau der WEA insgesamt und keineswegs speziell die Demontage und die Entsorgung von Rotorblattabfällen betreffende Thematik.

7.5.1.1.3 Gewässerschutz bei der Demontage von Rotorblättern

Welche Anforderungen sich aus dem Wasserrecht beim Rückbau der WEA und insbesondere bei der Demontage, der Zerkleinerung und dem Abtransport der Rotorblätter ergeben, hängt entscheidend von der Lage des Betriebsstandorts der WEA zu benachbarten Oberflächengewässern und der Möglichkeit einer Beeinträchtigung des Grundwassers ab.

6.5.1.1.3.1 WEA in der Nachbarschaft von Oberflächengewässern

WEA sind nach § 36 Abs. 1 S. 1 WHG in, an, über und unter oberirdischen Gewässern so zu errichten, zu betreiben, zu unterhalten und stillzulegen, dass keine schädlichen Gewässerveränderungen zu erwarten sind und die Gewässerunterhaltung nicht mehr erschwert wird, als es den Umständen nach unvermeidbar ist. Schädliche Gewässerveränderungen in diesem Sinne sind Veränderungen von Gewässereigenschaften, die das Wohl der Allgemeinheit, insbesondere die öffentliche Wasserversorgung, beeinträchtigen oder die nicht den Anforderungen entsprechen, die sich aus diesem Gesetz, aus auf Grund des WHG erlassenen oder aus sonstigen wasserrechtlichen Vorschriften ergeben.

Für die Errichtung von WEA gibt es bundes- und landesrechtliche Vorgaben hinsichtlich des Abstands, den diese Anlagen zu Gewässern einzuhalten haben. So dürfen z. B. im Außenbereich an Bundeswasserstraßen und Gewässern erster Ordnung sowie an stehenden Gewässern mit einer Größe von mehr als 1 ha im Abstand bis zu 50 Metern von der Uferlinie gem. § 61 Abs. 1 S. 1 BNatSchG keine WEA errichtet oder wesentlich geändert werden. An den Küstengewässern ist abweichend von § 61 Abs. 1 S. 1 BNatSchG ein Abstand von mindestens 150 Metern von der mittleren Hochwasserlinie an der Nordsee und von der Mittelwasserlinie an der Ostsee einzuhalten. Weitergehende Vorschriften der Länder bleiben nach § 61 Abs. 1 S. 3 BNatSchG ausdrücklich unberührt. Dementsprechend dürften Beeinträchtigungen von Oberflächengewässern beim Rückbau der Rotoren in aller Regel wegen des Abstandes zu Oberflächengewässern vermeidbar sein. Denkbar ist der Eintrag von wassergefährdenden Stoffen durch Verwehungen, wenn bei der Demontage der Rotorblätter solche Stoffe freigesetzt und nicht hinreichend zurückgehalten werden.

6.5.1.1.3.2 Beeinträchtigungen des Grundwassers

Maßnahmen des Rückbaus, die geeignet sind, in einem nicht nur unerheblichen Ausmaß nachteilige Veränderungen der Wasserbeschaffenheit des Grundwassers herbeizuführen, können als unechte Gewässerbenutzung nach § 9 Abs. 2 Nr. 2 WHG wasserrechtlich erlaubnispflichtig sein. Die Erlaubnis ist nach § 12 Abs. 1 WHG zu versagen, wenn schädliche, auch durch Nebenbestimmungen nicht vermeidbare oder nicht ausgleichbare Gewässerveränderungen zu erwarten sind oder andere Anforderungen nach öffentlich-

rechtlichen Vorschriften nicht erfüllt werden. Es muss auch insoweit dafür Sorge getragen werden, dass es durch den Rückbau und ggfs. auch durch die Zerkleinerung der Rotorblätter nicht zu nachteiligen Veränderungen eines benachbarten Oberflächengewässers oder des Grundwassers kommt.

Gem. § 47 Abs. 1 WHG ist das Grundwasser so zu bewirtschaften, dass eine Verschlechterung seines mengenmäßigen und seines chemischen Zustands vermieden wird; alle signifikanten und anhaltenden Trends ansteigender Schadstoffkonzentrationen auf Grund der Auswirkungen menschlicher Tätigkeiten umgekehrt werden und ein guter mengenmäßiger und ein guter chemischer Zustand erhalten oder erreicht werden. Eine Erlaubnis für das Einbringen und Einleiten von Stoffen in das Grundwasser darf nach § 48 Abs. 1 WHG nur erteilt werden, wenn eine nachteilige Veränderung der Wasserbeschaffenheit nicht zu besorgen ist.

Spezifische Regeln gelten für Wasserschutz- und für Heilschutzquellengebiete. Beim Rückbau der WEA und der Demontage der Rotorblätter vor Ort können wassergefährdende Stoffe in ein durch Verordnung geschütztes Grundwasser insbesondere dann gelangen, wenn die Rotorblätter vor Ort zerkleinert werden. Die Errichtung und der Betrieb von WEA sind im Geltungsbereich von Wasserschutzgebieten aber ohnehin zumeist nicht zulässig. Flächen in den Wasserschutzzonen I und II sind für WEA von vornherein in aller Regel ungeeignet. Die Wasserschutzzone III bietet Schutz vor schwer abbaubaren Verunreinigungen im großräumigen Umfeld einer Wassergewinnungsanlage und soll das unterirdische Einzugsgebiet der Gewinnungsanlage erfassen. Zu baulichen Anlagen und insoweit auch WEA regeln die Schutzgebietsverordnungen zumeist Genehmigungspflichten. In der Genehmigung sind mögliche Gefährdungen der Wassergewinnung während der Errichtung, dem Betrieb und auch beim Rückbau einer WEA durch geeignete Nebenbestimmungen zu minimieren. Das ist insbesondere bei der Zerkleinerung von Rotorblättern am Standort der Anlage zu berücksichtigen.

7.5.1.1.4 Schädliche Umweltauswirkungen der Demontage von Rotorblättern

WEA sind bauliche Anlagen und als solche – wie erläutert – baurechtlich genehmigungspflichtig. Darüber hinaus handelt es sich aber auch um Anlagen im Sinne von § 3 Abs. 5 BImSchG. Ab einer Gesamthöhe von mehr als 50 Metern sind sie nach Anhang 1 Nr. 1.6 der 4. BImSchV immissionsschutzrechtlich genehmigungsbedürftig. Kleinere Anlagen bedürfen zwar keiner immissionsschutzrechtlichen Genehmigung; sie sind jedoch als insoweit nicht genehmigungsbedürftige Anlagen in den Anwendungsbereich der §§ 22-25 BImSchG einbezogen.

Nach § 5 Abs. 3 BImSchG sind immissionsschutzrechtlich genehmigungsbedürftige Anlagen so zu errichten, zu betreiben und stillzulegen, dass auch nach einer Betriebsstilllegung von der Anlage oder des Anlagengrundstücks keine schädlichen Umwelteinwirkungen und sonstige Gefahren, erhebliche Nachteile und erhebliche Belästigungen für die Allgemeinheit und die Nachbarschaft hervorgerufen werden können. Die Pflichten des § 5 Abs.3 BImSchG betreffen den Bereich der Gefahrenabwehr und nicht eine Vorsorgepflicht für die Zeit nach dem Anlagenbetrieb. Zu den danach notwendigen Maßnahmen kann insbesondere auch die Verhinderung von Emissionen oder sonstiger Auswirkungen gehören.

Schädliche Umwelteinwirkungen sind nach § 3 Abs. 1 BImSchG Immissionen, die nach Art, Ausmaß oder Dauer geeignet sind, Gefahren, erhebliche Nachteile oder erhebliche Belästigungen für die Allgemeinheit oder die Nachbarschaft herbeizuführen. Immissionen in diesem Sinne sind

gemäß § 3 Abs. 2 BImSchG unter anderem auf Mensch und Umwelt einwirkende Luftverunreinigungen. Luftverunreinigungen sind nach § 3 Abs. 4 BImSchG Veränderungen der natürlichen Zusammensetzung der Luft, insbesondere auch durch Staub, Gase, etc.

Bei der Demontage und Zerteilung der Rotorblätter vor Ort können Luftverunreinigungen im vorgenannten Sinne verursacht werden. Soweit im Hinblick auf die Pflichten der Betreiber von nicht genehmigungsbedürftigen WEA nach § 22 Abs. 1 Nrn. 1 und 2 BImSchG zu beurteilen ist, ob schädliche Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen vorliegen, sollen die in Nr. 4 Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMUV) 24.07.2002 festgelegten Grundsätze zur Ermittlung und Maßstäbe zur Beurteilung von schädlichen Umwelteinwirkungen herangezogen werden. Da die Nachsorgepflichten des § 5 Abs. 3 BImSchG nicht der Gefahrenvorsorge dienen, sind für die Demontage der Rotorblätter die Vorsorgebestimmungen der Nr. 5 TA Luft nicht anwendbar.

Nach § 66 BImSchG ist bis zum Inkrafttreten von entsprechenden Rechtsverordnungen oder allgemeinen Verwaltungsvorschriften nach dem BImSchG für den Lärm im Zusammenhang dem Abbau oder Abbruch baulicher Anlagen die Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Schutz gegen Baulärm – Geräuschimmissionen (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMUV)) maßgebend. Bei der AVV Baulärm handelt es sich um eine sog. normkonkretisierende Verwaltungsvorschrift, die auch von den Gerichten angewendet wird. Sie gilt aber stets nur für den Regelfall (VG Bremen, Beschl. v. 29.10.2021 – 1 V 1505/21, juris Rn. 24; BVerwG, Urt. v. 10.07.2012 – 7 A 11.11, juris Rn. 26 f.). Die VV gilt für den Betrieb von Baumaschinen auf Baustellen, soweit die Baumaschinen gewerblichen Zwecken dienen oder im Rahmen wirtschaftlicher Unternehmungen Verwendung finden. Sie enthält Bestimmungen über Richtwerte für die von Baumaschinen auf Baustellen hervorgerufenen Geräuschimmissionen, das Messverfahren und über Maßnahmen, die von den zuständigen Behörden bei Überschreiten der Immissionsrichtwerte angeordnet werden sollen.

Überschreitungen der Immissionsrichtwerte nach der AVV Baulärm beim Rückbau von Rotorblättern sind nur zulässig, wenn der Baulärm unvermeidbar, d. h. die Einhaltung der Richtwerte auch bei Ausschöpfung aller Lärmminderungsmaßnahmen nach dem Stand der Technik nicht möglich ist, was der Aufsichtsbehörde durch das Gutachten eines Lärmsach-verständigen nachgewiesen werden muss. Es wird insoweit zu erörternmuss deshalb im Einzelfall geklärt werden sein, was nach dem Stand der Technik als Lärmminderungsmaßnahme beim Rückbau von Rotorblättern geboten ist.

Die Demontage der Rotorblätter kann auch zu Lärmbeeinträchtigungen geschützter Tier- und Pflanzenarten und von FFH-Schutzgebieten und Vogelschutzgebieten führen. Lärmbeeinträchtigungen können durch die Zerlegung der Rotorblätter durch Sägen und durch die Abfuhr der zerlegten Rotorblätter durch LKW erzeugt werden; ihnen kann für den Fall, dass sich daraus Beeinträchtigungen geschützter Tier- und Pflanzenarten und von FFH-Schutzgebieten und Vogelschutzgebieten ergeben könnten, durch die Beschränkung von Betriebszeiten, etwa für die Nacht oder auch für Brutzeiten von Vogelarten, nötigenfalls auch durch schall-schützende Maßnahmen und schließlich auch durch Auflagen zu Art und Umfang der Zerlegung der Rotorblätter vor Ort Rechnung getragen werden.

7.5.1.1.5 GewAbfV

In den Anwendungsbereich der Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMUV) fallen auch Bau- und Abbruchabfälle, die definiert werden als bei Bau- und Abbrucharbeiten anfallende mineralische und weitere nicht mineralische Abfälle, die in Kapitel 17 der Anlage der AVV aufgeführt sind, mit Ausnahme von Böden und Steinen. Auf die Entsorgung von Rotorblättern ist die GewAbfV dementsprechend anwendbar, soweit es sich bei diesen Rotorblätter Abfällen um Bau- und Abbruchabfälle im vorgenannten Sinne handelt.

Die GewAbfV gilt nach § 1 Abs. 2 GewAbfV für Erzeuger und Besitzer von gewerblichen Siedlungsabfällen und für die in § 1 Abs. 1 Nr. 2GewAbfV genannten Bau- und Abbruchabfälle sowie für Betreiber von Vorbehandlungs- und Aufbereitungsanlagen. Die GewAbfV verpflichtet Erzeuger und Besitzer der Abfälle zur Getrennterfassung von u. a. Glas, Kunststoffen, Metallen, Holz sowie für Beton (§ 8 Abs. 1 Nrn. 1-4 und 8 GewAbfV). Ausnahmen von der Getrennterfassungspflicht bestehen, soweit die getrennte Sammlung technisch nicht möglich oder wirtschaftlich nicht zumutbar ist (§ 8 Abs. 2 GewAbfV).

Entfallen die Pflichten nach § 8 Abs. 1 GewAbfV unter den Voraussetzungen des § 8 Abs. 2 GewAbfV, sind Erzeuger und Besitzer der nicht getrennt gehaltenen Abfälle verpflichtet, Gemische, die überwiegend Kunststoffe, Metalle einschließlich Legierungen, oder Holz enthalten, unverzüglich einer Vorbehandlungsanlage zuzuführen.

Für die Frage, ob und inwieweit es für die Entsorgung der Rotorblätter weiterer behördlicher Überwachungsinstrumente bedarf, ist auch der Umfang der bereits durch die GewAbfV vorgeschriebenen Dokumentationen und Überwachungen maßgeblich.

§ 9 Abs. 6 GewAbfV sieht Dokumentationspflichten, die §§ 10, 11 GewAbfV sehen eine Eigen- und Fremdkontrolle bei Vorbehandlungsanlagen vor. Die Eigenkontrolle nach § 10 GewAbfV erstreckt sich auf eine Annahme- und Ausgangskontrolle. § 10 Abs. 3 S. 1 GewAbfV bestimmt, dass Betreiber von Vorbehandlungsanlagen sich die weitere Entsorgung der ausgelieferten Abfälle innerhalb von 30 Kalendertagen nach Auslieferung von den jeweiligen Betreibern derjenigen Anlagen bestätigen lassen müssen, in denen die ausgelieferten Abfälle behandelt, verwertet oder beseitigt und nichtausschließlich gelagert werden. In der Bestätigung sind gem. § 10 Abs. 3 S. 2 GewAbfV im Fall der Verwertung anzugeben, ob ein Recycling oder eine sonstige Verwertung vorliegt und die Art der Anlage; soweit die weitere Entsorgung in einer genehmigungsbedürftigen Anlage erfolgt, auf der Grundlage der Bezeichnung im Genehmigungsbescheid.

§ 11 Abs. 1 S. 1 GewAbfV bestimmt, dass Betreiber von Vorbehandlungsanlagen für jedes Kalenderjahr innerhalb von zwei Monaten nach Jahresende eine Fremdkontrolle nach § 11 Abs. 1 Satz 2 GewAbfV durch eine von der zuständigen Behörde bekannt gegebene Stelle durchführen zu lassen haben.

Die Fremdkontrolle, die insbesondere durch die Kontrolle der vorzuhaltenden Dokumentationen erfolgen kann, umfasst die Überprüfung, ob die Anforderungen nach den §§ 6 und 10 GewAbfV eingehalten werden. Betreiber von Vorbehandlungsanlagen haben nach § 11 Abs. 2GewAbfV sicherzustellen, dass ihnen die Ergebnisse der Fremdkontrolle unverzüglich nach ihrer Erstellung mitgeteilt werden und dass die Ergebnisse der Fremdkontrolle unverzüglich der zuständigen Behörde zu übermitteln sind.

§ 8 Abs. 1a) der am 01.08.2023 in Kraft tretenden Änderung der GewAbfV sieht vor, dass soweit beim Rückbau, bei der Sanierung oder bei der Reparatur technischer Bauwerke Stoffe nach § 2 Nr. 18 bis 29 und 32 der ErsatzbaustoffV als Abfälle anfallen, für die Getrenntsammlung, die Vorbereitung zur Wiederverwendung und das Recycling dieser Abfälle ausschließlich § 24 der ErsatzbaustoffV gilt.

7.5.1.1.6 ErsatzbaustoffV

Nach § 1 Abs. 1 Nr. 1 der am 01.08.2023 in Kraft tretenden Ersatzbaustoffverordnung regelt die Verordnung im Hinblick auf mineralische Ersatzbaustoffe im Sinne des § 2 Nr. 1 Bundesregierung (BReg) Anforderungen an die Herstellung dieser mineralischen Ersatzbaustoffe in mobilen und stationären Anlagen und an das Inverkehrbringen von mineralischen Ersatzbaustoffen. Mineralische Ersatzbaustoffe im Sinne der Verordnung sind mineralische Baustoffe, die

1. als Abfall oder als Nebenprodukt in Aufbereitungsanlagen hergestellt werden oder bei Baumaßnahmen, beispielsweise Rückbau, Abriss, Umbau, Ausbau, Neubau und Erhaltung anfallen, oder
2. unmittelbar oder nach Aufbereitung für den Einbau in technische Bauwerke geeignet und bestimmt sind und unmittelbar oder nach Aufbereitung unter die in § 2 Nrn. 18 bis 33 bezeichneten Stoffe fallen.

§ 24 Abs. 1 ErsatzbaustoffV bestimmt, dass Erzeuger und Besitzer die in § 2 Nr. 18 bis 33 GewAbfV bezeichneten mineralischen Stoffe und Gemische im Sinne des § 2 Nr. 2 GewAbfV, die als Abfälle bei Rückbau, Sanierung oder Reparatur technischer Bauwerke anfallen, untereinander und von Abfällen aus Primärbaustoffen getrennt zu sammeln, zu befördern und nach Maßgabe des § 8 Abs. 1 S. 1 KrWG vorrangig der Vorbereitung zur Wiederverwendung oder dem Recycling zuzuführen haben. Soweit diese Abfälle für den Einbau in technische Bauwerke vorgesehen, jedoch nicht unmittelbar hierfür geeignet sind, haben die Erzeuger und Besitzer der genannten Abfallfraktionen diese einer geeigneten Aufbereitungsanlage zuführen. Eine erneute Verwertung der getrennt gesammelten mineralischen Ersatzbaustoffe in einem technischen Bauwerk ist nach § 24 Abs. 2 ErsatzbaustoffV möglich, wenn diese nach der Art des mineralischen Ersatzbaustoffes sowie seiner Materialklasse eindeutig bestimmt wurden. Abweichend von § 24 Abs. 1 S. 1 GewAbfV ErsatzbaustoffV können Recycling-Baustoffe nach § 24 Abs. 3 GewAbfV ErsatzbaustoffV gemeinsam mit gleichartigen Abfallfraktionen aus Primärbaustoffen gesammelt und befördert werden. Die vorgenannten Pflichten entfallen, soweit die getrennte Sammlung der jeweiligen Abfallfraktion technisch nicht möglich oder wirtschaftlich nicht zumutbar ist.

7.5.1.1.7 AltholzV

Soweit Rotorblattkonstruktionen auch aus Holz bestehen, können sich Anforderungen an die Behandlung und Entsorgung auch aus § 3 Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMUV) 15.08.2020 ergeben. Nach § 3 Abs. 1 S. 1 AltholzV sind zur Gewährleistung einer schadlosen stofflichen Verwertung von Altholz die Anforderungen des Anhangs I der AltholzV einzuhalten. Gemäß Anhang I dürfen für die in Spalte 1 bezeichneten Verwertungsverfahren nur die in Spalte 2 genannten Altholzkategorien unter Beachtung der in Spalte 3 aufgeführten besonderen Anforderungen an die stoffliche Verwertung eingesetzt werden. Die zum Zwecke der Herstellung von Holzwerkstoffen aufbereiteten Holzhackschnitzel und Holzspäne dürfen die in Anhang II genannten Grenzwerte nicht überschreiten. Diese gelten als eingehalten, wenn der Grenzwert im gleitenden Durchschnitt der vier zuletzt nach § 6 Abs. 2

AltholzV durchgeführten Untersuchungen nicht überschritten wird und kein Analyseergebnis den Grenzwert um mehr als 25 % überschreitet.

Die energetische Verwertung von Altholz hat gem. § 3 Abs. 2 AltholzV entsprechend den Regelungen des BImSchG und den auf seiner Grundlage ergangenen Rechtsverordnungen zu erfolgen.

7.5.1.2 Schadlosigkeit der Entsorgung

Die Verwertung von Rotorblattabfällen ist nach § 7 Abs. 2 S. 2 KrWG nur zulässig, wenn sie auch schadlos erfolgt. Die Verwertung ist nach § 7 Abs. 3 S. 3 KrWG schadlos, wenn nach der Beschaffenheit der Abfälle, dem Ausmaß der Verunreinigungen und der Art der Verwertung Beeinträchtigungen des Wohls der Allgemeinheit nicht zu erwarten sind, insbesondere keine Schadstoffanreicherung im Wertstoffkreislauf stattfindet.

Eine Beeinträchtigung des Allgemeinwohls liegt danach insbesondere vor, wenn die Gesundheit der Menschen beeinträchtigt wird, wenn Tiere oder Pflanzen gefährdet werden, wenn Gewässer oder Böden schädlich beeinflusst werden, schädliche Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen oder Lärm herbeigeführt werden, die Ziele oder Grundsätze und sonstigen Erfordernisse der Raumordnung nicht beachtet oder die Belange des Naturschutzes, der Landschaftspflege sowie des Städtebaus nicht berücksichtigt werden oder die öffentliche Sicherheit oder Ordnung in sonstiger Weise gefährdet oder gestört wird.

Das Erfordernis der schadlosen Verwertung ist - anders als das Erfordernis der Ordnungsmäßigkeit - ein eigenständiger abfallrechtlicher Prüfungsmaßstab. Die Schadlosigkeit der Verwertung tritt als zusätzliche Anforderung neben die Voraussetzung der Ordnungsmäßigkeit (Beckmann, 2021, § 7 KrWG Rn. 52). Die Schadlosigkeit ist ein originär abfallrechtlicher Maßstab einer umweltverträglichen Verwertung, der sich auf die Verwertungsart und das Verwertungsprodukt bezieht, sofern noch keine speziellere gesetzliche Regelung getroffen wurde. Das Kriterium der Schadlosigkeit hat deshalb umso geringere Bedeutung, je ausführlicher Rechtsvorschriften die Verwertung bereits regeln und damit die Gemeinwohlbelange konkretisieren. Sind die Grenzen der Abfallverwertung durch formelles oder materielles Recht geregelt, greift schon das Erfordernis der Ordnungsmäßigkeit der Verwertung als begrenzendes Kriterium ein. Es bedarf dann keines Rückgriffs auf das Kriterium der Schadlosigkeit.

Für die Entsorgung von Rotorblättern stellt sich insoweit die Frage, ob die Anforderungen an die Verwertung in den geltenden gesetzlichen und untergesetzlichen Bestimmungen hinreichend geregelt sind, sodass es keines Rückgriffs mehr auf das Kriterium der Schadlosigkeit bedarf. Das gilt sowohl mit Blick auf den bei der Entsorgung gebotenen Arbeitsschutz als auch hinsichtlich möglicher Umweltbelastungen durch die Freisetzung von Schadstoffen bei der Demontage, Zerlegung, Aufbereitung und Verwertung der Rotorblätter. So existiert bislang zum Beispiel kein Arbeitsschutzgrenzwert für lungengängige Carbonfasern, sodass Maßnahmen zum Schutz der Beschäftigten bei Tätigkeiten mit Carbonfasern derzeit in Analogie zu Konzepten für Schutzmaßnahmen für andere Faserarten abgeleitet werden (Mattenklott und Gelder 2019, S. 319).

Für den Fall, dass Gefahren, die bei der Entsorgung von Rotorblättern auftreten, noch nicht hinreichend geregelt sind, insbesondere durch Schadstoffgrenz- oder Orientierungswerte, kann

auf das Kriterium der Schadlosigkeit zurückgegriffen werden. In diesem Fall könnte es sich allerdings anbieten, angesichts der Offenheit des Begriffs der Schadlosigkeit entweder verbindliche Schadstoffgrenzwerte einzuführen oder aber untergesetzlich eine entsprechende Normkonkretisierung herbeizuführen.

7.5.1.3 Technische Möglichkeit der Entsorgung

Die Pflicht zur Verwertung von Abfällen ist gem. § 7 Abs. 4 S. 1 KrWG zu erfüllen, soweit dies technisch möglich ist. Die Verwertung von Abfällen ist gem. § 7 Abs. 4 S. 3 KrWG auch dann technisch möglich, wenn hierzu eine Vorbehandlung erforderlich ist. Für die Entsorgung von Rotorblättern entfällt eine auf eine bestimmte hochwertige Verwertung bezogene Pflicht zur Entsorgung, wenn eine solche Verwertungsmaßnahme technisch noch nicht möglich ist. Die Verwertung der Rotorblätter scheitert aber nicht an dem Erfordernis des technisch Möglichen, weil technische Möglichkeiten zur Verwertung der Rotorblattabfälle unzweifelhaft bestehen. Diese Pflichtenbegrenzung kann sich jedoch auf grundsätzlich mit Blick auf die Hochwertigkeit der Verwertung gem. § 8 Abs. 1 S. 3 KrWG und auf die Abfallhierarchie des § 6 Abs. 1 KrWG grundsätzlich vorzugswürdige Verwertungsvarianten beziehen, die an noch nicht vorhandenen technischen Möglichkeiten scheitern.

Der Begriff „technisch möglich“ wird weder im KrWG noch im Immissionsschutzrecht konkretisiert. § 7 Abs. 4 Satz 2 KrWG stellt lediglich fest, eine eventuell notwendige Vorbehandlung begründe keine Unmöglichkeit. Der Begriff der technischen Möglichkeit bedarf der Konkretisierung.

Die technische Möglichkeit, eine bestimmte Maßnahme der Abfallbewirtschaftung durchzuführen, richtet sich nicht nach dem in § 3 Abs. 28 KrWG definierten Stand der Technik (Beckmann, 2021, § 7 KrWG, Stand 1/2014, Rn. 61; Reese 2014, 2014, § 7 KrWG Rn. 71; Frische 2019, 2019, § 7 Rn. 58). Der Stand der Technik ist nach § 3 Abs. 28 S. 1 KrWG der Entwicklungsstand fortschrittlicher Verfahren, Einrichtungen oder Betriebsweisen, der die praktische Eignung einer Maßnahme zur Begrenzung von Emissionen in Luft, Wasser und Boden, zur Gewährleistung der Anlagensicherheit, zur Gewährleistung einer umweltverträglichen Abfallentsorgung oder sonst zur Vermeidung oder Verminderung von Auswirkungen auf die Umwelt insgesamt gesichert erscheinen lässt. Aus dem so definierten Stand der Technik ergibt sich nicht, ob eine Abfallverwertungsmaßnahme technisch möglich ist, sondern welche Anforderungen an die Durchführung einer solchen Verwertungsmaßnahme zu stellen sind. Hätte der Gesetzgeber mit dem Begriff „technisch möglich“ die gleiche inhaltliche Aussage wie mit dem Begriff des „Standes der Technik“ treffen wollen, so hätte es nicht der Verwendung verschiedenartiger Begriffe bedurft (Beckmann,2021, § 7 KrWG Rn. 62).

Die technische Möglichkeit im Sinne von § 7 Abs. 2 S. 4 KrWG setzt voraus, dass die angestrebte Maßnahme praktisch umsetzbar ist. Daran fehlt es, wenn die technischen Voraussetzungen für eine solche Maßnahme nicht existieren oder nur wissenschaftlich vorgedacht sind. Voraussetzung dafür ist, dass die theoretische technische Machbarkeit tatsächlich auch schon umgesetzt ist oder ohne längere Entwicklungsphasen praktisch geeignet erscheint, eingesetzt zu werden. In allen anderen Fällen liegt für den Verantwortlichen eine objektive Unmöglichkeit der Verwertungsmaßnahme vor. Die technische Unmöglichkeit stellt einen Unterfall der objektiven Unmöglichkeit dar. Ist die Verwertungsmaßnahme objektiv unmöglich, wenn es an einer einsetzbaren Technik fehlt, und würde man den Entsorgungspflichtigen in dieser Situation gleichwohl eine Verwertungspflicht auferlegen, widerspräche dies dem Grundsatz der

Verhältnismäßigkeit. Die Einforderung von unmöglich zu erfüllenden Pflichten stellt eine ungeeignete Maßnahme zur Erreichung des gesetzgeberischen Ziels dar. Solche Verwertungsmaßnahmen können auch nicht im Rahmen der Abwägung zu Bestimmung eines Vorrangs berücksichtigt werden.

7.5.1.4 Wirtschaftliche Zumutbarkeit der Entsorgung

Die Pflicht zur Verwertung von Abfällen ist nach § 7 Abs. 4 S. 1 KrWG nur zu erfüllen, soweit dies wirtschaftlich zumutbar ist, insbesondere für einen gewonnenen Stoff oder gewonnene Energie ein Markt vorhanden ist oder geschaffen werden kann. Die wirtschaftliche Zumutbarkeit ist nach § 7 Abs. 4 S. 3 KrWG gegeben, wenn die mit der Verwertung verbundenen Kosten nicht außer Verhältnis zu den Kosten stehen, die für eine Abfallbeseitigung zu tragen wären.

7.5.1.4.1 Marktgängigkeit des Verwertungsprodukts

Ein Markt i. S. d. § 7 Abs. 4 Satz 1 KrWG ist in ökonomischer Hinsicht vorhanden, wenn für das Angebot eines durch die Abfallverwertung gewonnen Stoffes oder einer aus der energetischen Verwertung von Abfällen gewonnenen Energie eine Nachfrage besteht oder sich zumindest in absehbarer Zeit bilden wird (Beckmann, 2021, § 7 KrWG Rn. 68).

Allein aus dem Vorliegen eines Marktes oder der Möglichkeit der Schaffung eines solchen kann auch nicht die wirtschaftliche Zumutbarkeit der Verwertungsmaßnahme gefolgert werden. Ist bei vorhandenem Markt das Recyclingprodukt letztlich unverkäuflich, so fehlt es an der wirtschaftlichen Zumutbarkeit (Beckmann, 1995, S. 322). Der Gesetzgeber hat nicht zum Ziel, den zur Verwertung Verpflichteten um jeden Preis an eine Verwertungspflicht zu binden, sobald ein Markt für das Recyclingprodukt vorliegt. Vielmehr ist die Verwertung wirtschaftlich unzumutbar, sofern der Verwertungspflichtige trotz vorhandenem Markt, d. h. trotz vorliegender allgemeiner Nachfrage für seine Recyclingprodukte, keine Abnehmer finden kann. Der Begriff des Marktes bedeutet demzufolge auch Vermarktbarkeit. Darüber hinaus wäre es volkswirtschaftlich sinnlos, die Herstellung nicht absetzbarer Recyclingprodukte zu fordern (Beckmann, 2021, § 7 KrWG Rn. 70).

7.5.1.4.2 Kostenvergleich

§ 7 Abs. 4 S. 3 KrWG konkretisiert den zentralen Begriff der wirtschaftlichen Zumutbarkeit. Wirtschaftlich zumutbar ist die Verwertungsmaßnahme, wenn die mit der Verwertung verbundenen Kosten nicht außer Verhältnis zu den Kosten stehen, die für eine Abfallbeseitigung zu tragen wären. Es bedarf insoweit eines Vergleichs der Kosten der Verwertungsmaßnahme mit den Kosten einer Beseitigungsmaßnahme.

Eine Verwertung muss weder gewinnbringend noch kostendeckend sein (VG Schleswig, Urt. v. 08.03.1999 – 4 A 1/99, NVwZ 2000, 830, 832). Abzustellen ist auf die Leistungsfähigkeit eines durchschnittlichen Betriebs. Wenn die Verwertungskosten so hoch sind, dass sie die Erzielung angemessener Gewinne unmöglich machen, sind sie wirtschaftlich unzumutbar (Beckmann, 2021, § 7 KrWG Rn. 70).

7.5.2 Rangfolge und Hochwertigkeit der Verwertung (§ 8 KrWG)

Bei der Erfüllung der Verwertungspflicht nach § 7 Abs. 2 Satz 1 KrWG hat nach § 8 Abs. 1 S. 1 KrWG diejenige der in § 6 Abs. 1 Nrn. 2 bis 4 KrWG genannten Verwertungsmaßnahmen Vorrang, die den Schutz von Mensch und Umwelt nach der Art und Beschaffenheit des Abfalls unter Berücksichtigung der in § 6 Abs. 2 Satz 2 und 3 KrWG festgelegten Kriterien am besten

gewährleistet. Zwischen mehreren gleichrangigen Verwertungsmaßnahmen besteht ein Wahlrecht des Erzeugers oder Besitzers von Abfällen (§ 8 Abs. 1 S. 2 KrWG). Bei der Ausgestaltung der durchzuführenden Verwertungsmaßnahme ist nach § 8 Abs. 1 S. 3 KrWG eine den Schutz von Mensch und Umwelt am besten gewährleistende, hochwertige Verwertung anzustreben. § 7 Abs. 4 KrWG findet auf die Sätze 1 bis 3 entsprechende Anwendung.

§ 8 Abs. 1 S. 1 KrWG schreibt lediglich vor, welche der in § 6 Abs. 1 Nr. 2-4 KrWG genannten Verwertungsmaßnahmen Vorrang genießen soll. Die Vorschrift bestimmt dementsprechend nicht, welches Verwertungsverfahren innerhalb derselben Rangstufe auszuwählen ist. Das ist insbesondere für die sonstige Verwertung, zu der unter anderem die energetische Verwertung und die Verfüllung rechnen, von Bedeutung. Kommen unter Berücksichtigung der in § 6 Abs. 2 S. 2 und 3 KrWG festgelegten Kriterien verschiedene Verwertungsmöglichkeiten in Betracht, die als sonstige Verwertung grundsätzlich gleichrangig sind, besteht ein Wahlrecht des Verpflichteten.

Das Hochwertigkeitsgebot des § 8 Abs. 1 S. 3 KrWG bezieht sich lediglich auf die Ausgestaltung der durchzuführenden Verwertungsmaßnahme, nicht jedoch auf die Bestimmung der Rangfolge. Dementsprechend wird das Wahlrecht zwischen gleichrangigen Verwertungsmaßnahmen nicht durch das Hochwertigkeitsgebot eingeschränkt. Insoweit muss zunächst festgestellt werden, an welcher Stelle der Rangfolge des § 6 Abs. 1 KrWG die vorgesehene Verwertungsmaßnahme einzuordnen ist. Danach ist nach § 8 Abs. 1 S. 1 KrWG zu prüfen, welche Verwertungsmaßnahme den Schutz von Mensch und Umwelt nach der Art und Beschaffenheit des Abfalls unter Berücksichtigung der in § 6 Abs. 2 Satz 2 und 3 festgelegten Kriterien am besten gewährleistet. Kommen danach mehrere Verwertungsverfahren als gleichrangig in Betracht, hat der Verantwortliche ein Wahlrecht nach § 8 Abs. 1 S. 2 KrWG. Für die Ausgestaltung der auf diesem Weg ausgewählten Verwertungsmaßnahme gilt dann das Hochwertigkeitsgebot des § 8 Abs. 1 S. 3 KrWG.

Die Vorschrift soll der Erkenntnis Rechnung tragen, dass sich nach Durchführung der in §§ 7 Abs. 2 S. 3, 6 Abs. 2 S. 2 KrWG geforderten Ökobilanz (siehe dazu Beckmann, 2021, § 7 KrWG Rn. 52) verschiedene Verwertungsmaßnahmen als gleichrangig erweisen können. Angesichts der Komplexität der geforderten Ökobilanz unter Berücksichtigung der in § 6 Abs. 2 S. 2 und 3 KrWG festgelegten Kriterien stellt sich die Frage, wer verbindlich über den Vorrang bzw. den Gleichrang entscheidet. Am Zuge sind zunächst die für die Abfallverwertung verantwortlichen Abfallbesitzer oder Abfallerzeuger. Sie müssen sich auf der Grundlage der genannten Kriterien vergewissern, ob eine der infrage kommenden Verwertungsmaßnahmen Vorrang genießt oder ob von einem Gleichrang ausgegangen werden kann. Die Entscheidung zwischen Vorrang oder Gleichrang muss rechtsdogmatisch im Wege der Auslegung des § 8 Abs. 1 S. 1 KrWG in Verbindung mit den Kriterien des § 6 Abs. 2 S. 2 und 3 KrWG getroffen werden. Angesichts der Offenheit der Kriterien und der im Einzelfall sogar möglicherweise konfligierenden Zielsetzungen zwischen dem Schutz von Mensch und Umwelt mag man in dem einen oder anderen Fall sowohl einen Vorrang als auch einen Gleichrang rechtfertigen können. Geht der Abfallbesitzer bzw. der Abfallerzeuger auf der Basis seiner Ökobilanz von einem Gleichrang aus, erwächst ihm als Rechtsfolge das bereits erwähnte Wahlrecht. Allerdings könnte die zuständige Abfallbehörde, wenn sie das Ergebnis der Ökobilanz des Abfallerzeugers bzw. Abfallbesitzers für unzutreffend hält, gegen die Verantwortlichen ordnungsrechtlich auf der Grundlage des § 62 KrWG einschreiten, um eine nach Auffassung der zuständigen Behörde vorrangige Verwertung durchzusetzen. In diesem Fall des ordnungsbehördlichen Einschreitens ist allerdings die

zuständige Behörde verpflichtet, die Voraussetzungen ihres Einschreitens nachzuweisen. Sie muss dann eine eigene Ökobilanz vorlegen und anhand der Kriterien des § 6 Abs. 2 S. 2 und 3 KrWG nachweisen, dass die Vorrangentscheidung des Abfallbesitzers bzw. Abfallerzeugers unzutreffend ist.

Es ist im Übrigen problematisch, den Entsorgungspflichtigen die Ermittlung des besten Entsorgungswegs anhand einer Ökobilanz unter Lebenszyklusaspekten aufzuerlegen. Angesichts der erforderlichen Abwägung und der dazu notwendigen, fachlich anspruchsvollen Analyse der abfallwirtschaftlichen und ökologischen Rahmenbedingungen ist eine solche Bilanzierung im Einzelfall für den verantwortlichen Abfallbesitzer und Abfallerzeuger kaum möglich. Die Abwägung ist aufgrund ihrer Komplexität in der Tat eher auf eine allgemeinverbindliche Umsetzung durch den Gesetzgeber bzw. den Verordnungsgeber angelegt. Dem einzelnen Abfallbesitzer und Abfallerzeuger die Verantwortung für eine solche Entscheidungsfindung im Rahmen eines normalen Entsorgungsvorgangs mit dem Risiko einer unrechtmäßigen Entsorgung aufzuerlegen, ist unverhältnismäßig (Beckmann, 2021, § 8 KrWG Rn. 12; Krahnefeld/Conzelmann, 2012, S. 274). Das kann auch für die Entsorgung von Rotorblattabfällen gelten, wenn verschiedene Verwertungsmaßnahmen zu vergleichen sind.

Fraglich ist, ob und gegebenenfalls welcher Erkenntnisgewinn sich aus den Rechercheergebnissen der Kapitel 4 bis 6 für die Rangfolge und Hochwertigkeit der in Aussicht genommenen Maßnahmen zur Verwertung der Rotorblattabfälle ziehen lässt. Ausgangspunkt für eine Bewertung mit Blick auf die Rangfolge und Hochwertigkeit der Verwertungsmaßnahmen sind die in Kapitel 6 beschriebenen und bewerteten Verwertungsverfahren, bei denen es sich überwiegend insgesamt um Recycling-Verfahren handelt, die sich auf derselben Hierarchiestufe des § 6 Abs. 1 KrWG befinden. Die in Kapitel 4 erörterten technischen Verfahren zum Zerlegen der Rotorblätter am Standort der stillgelegten WEA gehören genauso wie die in Kapitel 5 beschriebenen und bewerteten Technologien zur Zerkleinerung, Klassierung und Sortierung von Rotorblattabfällen zu den Vorbereitungsmaßnahmen für die sich anschließenden Verwertungs-, insbesondere Recycling-Maßnahmen. Als Recycling bezeichnet der Gesetzgeber nach § 3 Abs. 25 KrWG jedes Verwertungsverfahren, durch das Abfälle zu Erzeugnissen, Materialien oder Stoffen entweder für den ursprünglichen Zweck oder für andere Zwecke aufbereitet werden. Die Zerteilung der Rotorblätter vor Ort und ihre Aufbereitung in einer Aufbereitungsanlage sind, soweit sie einem anschließenden Recycling dienen, Maßnahmen zur Vorbereitung des weiteren Recyclings und damit Aufbereitungsmaßnahmen im vorgenannten Sinne.

Kennzeichnend für das Recycling ist der Umstand, dass Abfälle zu Erzeugnissen, Materialien oder Stoffen aufbereitet werden, die wiederum für den ursprünglichen Zweck oder andere Zwecke verwendet werden können. Im Gegensatz zur Vorbereitung zur Wiederverwendung sind daher auch intensivere Behandlungsmaßnahmen denkbar, durch die der aufbereitete Gegenstand auch für eine andere Verwendung aufbereitet werden kann. Da diese Verwertungsform ebenfalls dem Ressourcenschutz dient, wird sie nach § 6 Abs. 1 Nr. 3 KrWG als zweitbeste Verwertungsoption eingeordnet. Das Recycling ist dementsprechend gegenüber der Vorbereitung zur Wiederverwendung nachrangig, gegenüber einer sonstigen Verwertung hingegen vorrangig.

Eine Einordnung der Verwertung der Rotorblattabfälle als Recycling ist angesichts des in § 3 Abs. 25 KrWG sehr weit angelegten Begriffs unzweifelhaft, solange und soweit eine Aufbereitung

der Rotorblattabfälle dazu dient, das Material einer weiteren Verwendung zuzuführen, bei der es sich nicht um eine energetische Verwertung und auch nicht um die Aufbereitung zu Materialien handelt, die für die Verwendung als Brennstoff oder zur Verfüllung bestimmt sind. Dies ergibt sich aus der Klarstellung in § 3 Abs. 25 HS 2 KrWG wonach die energetische Verwertung, d. h. die Nutzung von Abfällen als Brennstoff, nicht unter das Recycling fällt. Das gleiche gilt für die Aufbereitung von Materialien, die für die Verwendung als Brennstoff oder zur Verfüllung bestimmt sind. Der Begriff der Verfüllung umfasste in der Vergangenheit die ober- wie untertägige Verfüllung. Derartige Verfahren werden auf Grund ihrer weniger günstigen Ressourceneffizienz nach der Abfallhierarchie des § 6 KrWG als grundsätzlich und vorbehaltlich der Prüfung nach § 6 Abs. 2 KrWG nachrangige Verwertungsoption beschrieben.

Die Wiedergewinnung einer verwendungsfähigen Faser mit Hilfe der Pyrolyse und die Herstellung eines Zementklinkers unter Verwendung der aufbereiteten Rotorblattabfälle ist in diesem Sinne als Recycling einzuordnen. Allerdings wird sowohl bei der Verwertung im Zementwerk als auch bei der Pyrolyse die mit den faserhaltigen Abfallfraktionen verbundene Matrix energetisch verwertet. Insoweit könnte man mit Blick auf diese Matrix bezweifeln, ob es sich bei ihrer Verwertung um Recycling handelt und ob die Verwertung insoweit zu Recht auf der dritten Stufe der Abfallhierarchie nach § 6 Abs. 1 Nr. 3 KrWG eingeordnet werden kann. Bei einem derartigen Stoffgemisch, bestehend aus einer recycelbaren, faserhaltigen Fraktion und einer nur energetisch zu verwertenden Matrix dürfte es in entsprechender Anwendung des § 3 Abs. 23 S. 1 KrWG auf das Hauptergebnis des Verwertungsvorgangs ankommen. Besteht dieses darin, bei der Pyrolyse wiederverwendbare Fasern zurückzugewinnen und beim Einsatz im Zementwerk darin, Zementklinker herzustellen, dann dürfte die energetische Verwertung nichts daran ändern, dass das Hauptergebnis in der Aufbereitung von Materialien für eine Verwendung abseits der energetischen Verwertung und einer Verfüllung besteht und dass damit eine Einordnung des Verwertungsvorgangs insgesamt als Recycling gerechtfertigt ist. Das dürfte unabhängig davon gelten, dass sowohl bei der Pyrolyse als auch auf der Zemtroute die Gewichtsanteile von rohstofflicher und energetischer Verwertung annähernd gleich groß sein können.

Nicht mehr als Recycling, sondern als sonstige Verwertung oder gar als Beseitigung mit einer gesetzlich vorgeschriebenen energetischen Verwertung der dabei anfallenden Energie gem. § 15 Abs. 1 S. 3 KrWG wäre die Pyrolyse der Rotorblattabfälle einzuordnen, wenn die Pyrolyse keine weiter verwendungsfähigen Fasern oder sonst verwendungsfähiges Material zum Ergebnis hätte, sondern lediglich ein für die Ablagerung tauglich vorbehandelter Restabfall entstünde. Das ist jedoch ausweislich der Ergebnisse des Kapitels 6 nicht der Fall.

Die vergleichenden Untersuchungen und Bewertungen zur Zerlegung der Rotorblätter vor Ort im Kap. 4 sind insoweit nicht maßgeblich für die Rangfolge der in Aussicht genommenen Recycling-Maßnahmen nach § 6 Abs. 1 KrWG und auch nicht für die Frage, ob sich im Sinne von § 6 Abs. 2 S. 1 KrWG sich an dieser Rangfolge deshalb etwas ändern könnte, weil nur eine bestimmte Maßnahme unter Berücksichtigung des Vorsorge- und Nachhaltigkeitsprinzips den Schutz der Umwelt am besten gewährleistet.

7.5.2.1 Bestmöglicher Umweltschutz bei der Zerlegung der Rotorblätter

Von Bedeutung können die Ergebnisse des Kapitels 3 jedoch für die sich aus § 8 Abs. 1 S. 3 KrWG ergebende Verpflichtung sein. Nach dieser Vorschrift soll bei der Ausgestaltung der durchzuführenden Verwertungsmaßnahme eine den Schutz von Mensch und Umwelt am besten

gewährleistende, hochwertige Verwertung angestrebt werden. Die nach § 8 Abs. 1 S. 3 KrWG anzustrebende Verwertung richtet sich auf zwei Ziele: Einerseits auf den (höchstmöglichen) Schutz von Mensch und Umwelt und andererseits auf eine Hochwertigkeit der Verwertung. Damit dient die Regelung einer Umsetzung der Zwecke des Gesetzes im Sinne von § 1 KrWG, die auf den Schutz von Mensch und Umwelt bei der Erzeugung und Bewirtschaftung von Abfällen und auf eine Förderung der Kreislaufwirtschaft zur Schonung der natürlichen Ressourcen gerichtet sind.

Was eine den Schutz von Mensch und Umwelt am besten gewährleistende Verwertung angeht, bedarf es einer Prüfung unter Berücksichtigung von Art und Beschaffenheit des Abfalls und der in § 6 Abs. 2 S. 2 und 3 KrWG festgelegten Kriterien. Diese Prüfungsmaßstäbe gelten insoweit nicht nur hinsichtlich der Auswahl der Verwertungsmaßnahmen im Vergleich zu möglichen Alternativen, sondern auch bei der Ausgestaltung der gewählten Verwertungsmaßnahme. Die Ergebnisse der Recherchen in Kapitel 4 ergeben, insbesondere bei der Beachtung von Maßgaben (z. B. Einhausung, Vermeidung von Staub- und Faserfreisetzungen sowie weiteren Maßnahmen zum Arbeitsschutz), keine eindeutige Präferenz für eine bestimmte Zerlegetechnik mit der Konsequenz, dass einzelne Zerlegetechniken von vornherein auszuschließen wären.

Dabei ist zu bedenken, dass es sich bei § 8 Abs. 1 S. 3 KrWG nicht um eine strikt und unmittelbar geltende Rechtspflicht, sondern nur um eine verpflichtende Bemühensvorgabe handelt (Beckmann, 2021, § 8 KrWG Rn. 19). Eine gesetzliche Regelung, die nur verlangt, dass ein bestimmter Erfolg „anzustreben“ sei, schafft keine konkreten, unmittelbar geltenden Rechtspflichten. Das Strebsamkeitsgebot ermöglicht es deshalb den Behörden nicht, dem Abfallbesitzer eine „minderwertige“ Verwertungstechnik, die alle gesetzlichen Anforderungen an die Abfallverwertung erfüllt, das heißt eine ordnungsgemäße und schadlose Verwertung ermöglicht, im Einzelfall zu verbieten (Beckmann 2010, S. 58; Beckmann, 2021, § 8 KrWG Rn. 19). Auch die Gesetzesbegründung stellt klar, dass ohne verordnungsrechtliche Vorgaben das Gesetz von den Erzeugern und Besitzern im Einzelfall keine strikte Durchführung der hochwertigsten Verwertungsoption verlangt (Bt-Drs. 17/6052, S. 79).

Für die anzustrebende Hochwertigkeit der Verwertungsmaßnahmen ergeben sich aus den Untersuchungen zu Kapitel 4 ebenfalls keine weiterführenden Vorgaben. Das Hochwertigkeitsgebot dient in erster Linie der Förderung der Kreislaufwirtschaft zur Schonung der natürlichen Ressourcen im Sinne von § 1 KrWG. Möglichst vermieden werden soll eine Verschlechterung der Stoffqualität, damit die Abfälle weiterhin anstelle von Primärrohstoffen eingesetzt werden können. Ob und inwieweit das durch das spätere Recyclingverfahren gelingt, hängt nicht von der Zerlegetechnik am Ort der Stilllegung der WEA ab.

Die vergleichende Bewertung ist insoweit eine Hilfestellung für diejenigen, die eine Entscheidung für eine bestimmte Zerlegetechnik zu treffen haben, und für Vorkehrungen, die zur Vermeidung von Schadstoffemissionen vor Ort notwendig sind. Aus der vergleichenden Bewertung lässt sich unter Verweis auf die Rangfolge und Hochwertigkeit der Verwertung keine Verpflichtung zur Wahl einer bestimmten Zerlegetechnik ableiten.

7.5.2.2 Bestmöglicher Umweltschutz bei der Aufbereitung der Rotorblätter

Für die Beschreibung und Bewertung der unterschiedlichen Technologien zur Aufbereitung, das heißt zur Zerkleinerung, Klassierung und Sortierung von Rotorblattmaterialien werden in Kapitel 5 technologische und wirtschaftliche Kriterien verwendet. Diese umfassen die

technischen Möglichkeiten (technischer Reifegrad des Verfahrens), den Durchsatz, den spezifischen Energieverbrauch, den Verschleiß, die erzielten Reinheiten, den Aufbereitungstyp und die Aufbereitungsziele sowie die Wirtschaftlichkeit der Aufbereitung. Auch die vergleichende Bewertung von Aufbereitungstechniken anhand der vorgenannten Kriterien ist nicht geeignet und auch nicht dazu gedacht, im Sinne von § 8 Abs. 1 S. 3 KrWG festzustellen, ob und ggfs. welche Aufbereitungstechnik den Schutz von Mensch und Umwelt am besten gewährleistet. Das wäre nur unter umfassender Berücksichtigung der Kriterien des § 6 Abs. 2 S. 2 KrWG möglich. Immerhin spielt der mitbewertete Energieverbrauch für die umweltbezogene Einschätzung eine erhebliche Rolle. Für die Frage der Hochwertigkeit der Aufbereitung sind außerdem die technischen Aufbereitungsziele, der Aufschluss des Materialverbundes und die Separierung stoffreiner Fraktionen von Bedeutung.

Die vergleichende Beschreibung und Bewertung zu den verschiedenen Aufbereitungstechniken ist insoweit eine Hilfestellung für diejenigen, die eine Entscheidung für eine bestimmte Aufbereitungstechnik zu treffen haben. Aus der vergleichenden Bewertung lässt sich unter Verweis auf die Rangfolge und Hochwertigkeit der Verwertung jedoch keine unmittelbare Verpflichtung zur Wahl einer bestimmten Aufbereitungstechnik ableiten. Selbstverständlich bleibt es dem Verordnungsgeber vorbehalten, nach § 8 Abs. 2 S. 1 Nr. 2 KrWG Anforderungen an die Aufbereitung zu stellen.

7.5.2.3 Bestmöglicher Umweltschutz und Hochwertigkeit der Verwertungs Recyclings

In Kapitel 6 werden die Verwertungsverfahren für aufbereitete Rotorblattabfälle nach den einzelnen getrennten und sortierten Fraktionen (glas- und carbonfaserverstärkte Kunststoffe, Eisen- und Nichteisenmetalle, verschiedene Schäume, Balsaholz, Klebstoffe sowie Lacke und Beschichtungen) bewertet. Ziel der Bewertung im Kapitel 5 ist es, auf der Grundlage von Informationen über die aufbereiteten Rotorblattabfälle (Mengenstrom, Zusammensetzung, Fremdstoffanteile, Kenngrößen wie Geometrie, Rieselfähigkeit, Dichte, Heizwert und Faserfüllungsgrad) geeignete und materialspezifische Verwertungsprozesse zu identifizieren. Zu den Beurteilungskriterien zählen die Kriterien: „Hochwertige Verwertung, ordnungsgemäße und schadlose Verwertung, Technischer Reifegrad (TRL), Kommerzielle Prozessetablierung, Verfügbare Kapazität“. Untersucht und bewertet werden Verfahren des Mechanischen Recyclings, des Thermochemischen Recyclings (Pyrolyse) und des Chemischen Recyclings (Solvolyse). Knapp zusammengefasst kommt Kapitel 6 des Forschungsberichts zu dem Ergebnis, dass eine Verwertung von glasfaserhaltigen Abfällen auf der Zementroute großtechnisch etabliert ist, während eine mechanische Verwertung dieser Abfälle sich bisher nicht etablieren konnte und weitere Verwertungsprozesse nur einen niedrigen TRL (Wirbelschicht, HV-Fragmentierung & Solvolyse) besitzen. Für die Verwertung von carbonfaserhaltigen Abfällen sei die Pyrolyse technisch etabliert, eine Verwertung auf der sog. Carbidroute sei nach Anlagenanpassung möglich; eine Verwertung carbonfaserhaltigen Abfällen in metallurgischen Prozessen als Reduktionsmittel sei ebenfalls grundsätzlich möglich. Weitere Prozesse besäßen einen (zu) niedrigen TRL. Das Recycling der Metallfraktionen sei als Standardverfahren unproblematisch; sortenreines Balsaholz sei ebenfalls verwertbar, sortenreine Schäume seien im Wege der Pyrolyse verwertbar. Allerdings gelte dies nur, wenn die Sortenreinheit durch eine Trennung auch unterschiedlicher Schaummaterialien sichergestellt werden könne. Lacke und Beschichtungen seien nicht trennbar vom GFK und müssten insoweit gemeinsam mit GFK verwertet werden.

Zusammen mit den Erkenntnissen aus Kapitel 2 zu den in den nächsten Jahrzehnten prognostizierten Abfallmengen können die Informationen aus Kapitel 6 dazu beitragen, abzuschätzen, ob und inwieweit zukünftig hinreichende Verwertungskapazitäten für die Entsorgung der Rotorblattabfälle zur Verfügung stehen werden oder ob mangels hinreichender, durch den Markt selbst aufgebauter Anlagenkapazitäten Hersteller und Vertreiber im Rahmen der Produktverantwortung dafür in Anspruch genommen werden müssen, ergänzende Anlagenkapazitäten zu installieren.

Schon angesichts kaum vorhandener Technikalternativen sind die Erkenntnisse des Kapitels 6 aber weniger geeignet, zwischen verschiedenen Verwertungstechniken auf der Grundlage von Kriterien des § 6 Abs. 2 S. 2 KrWG zu entscheiden, ob und inwieweit einzelne Verfahrenstechniken den Schutz von Mensch und Umwelt im Sinne von § 8 Abs. 1 S. 3 KrWG besser als andere Techniken sicherstellen und ob und inwieweit einzelne Techniken i.S.v. § 8 Abs. 1 S. 3 KrWG hochwertiger sind mit dem Ergebnis, dass andere Techniken das Hochwertigkeitskriterium des § 8 Abs. 1 S. 3 KrWG verfehlen.

Die genannten Recycling-Anlagen bedürfen für ihre Errichtung und ihren Betrieb immissionsschutzrechtlicher Genehmigungen, die nur bei Vorliegen der immissionsschutzrechtlichen Genehmigungsvoraussetzungen der §§ 5, 6 BImSchG erteilt werden. Ein genehmigungskonformer Anlagenbetrieb setzt insoweit stets voraus, dass zur Gewährleistung eines hohen Schutzniveaus für die Umwelt insgesamt schädliche Umwelteinwirkungen und sonstige Gefahren, erhebliche Nachteile und erhebliche Belästigungen für die Allgemeinheit und die Nachbarschaft nicht hervorgerufen werden können und dass Vorsorge gegen schädliche Umwelteinwirkungen und sonstige Gefahren, erhebliche Nachteile und erhebliche Belästigungen getroffen wird, insbesondere durch die dem Stand der Technik entsprechenden Maßnahmen. Es gibt insoweit keine Berechtigung den beschriebenen Verwertungsverfahren, so sie denn in genehmigungskonformer Weise betrieben werden, auf der Grundlage der Erkenntnisse Kapitels 6 zu attestieren, dass sie mit § 8 Abs. 1 S. 3 KrWG unvereinbar sind. Eine unmittelbare Verpflichtung ergibt sich für Abfallbesitzer und Anlagenbetreiber insoweit ohnehin nicht.

Die Bundesregierung kann jedoch als Verordnungsgeber, gestützt auf § 8 Abs. 2 KrWG, unter Berücksichtigung der Erkenntnisse aus dem Forschungsbericht und auf Grund der in § 6 Abs. 2 Satz 2 und 3 KrWG festgelegten Kriterien darüber entscheiden, ob eine Verwertungsmaßnahme vorrangig oder gleichrangig sein soll oder welche Kriterien für die Hochwertigkeit einer Verwertungsmaßnahme verbindlich für Abfallbesitzer und Anlagenbetreiber gelten sollen.

7.5.2.4 Zwischenfazit

Die Kapitel 4 bis 6 des Forschungsberichts, lieferten Erkenntnisse, welche Verfahrenstechniken für die Zerteilung der Rotorblätter vor Ort, für die Aufbereitung der zerteilten Rotorblätter durch Zerkleinerung, Klassierung und Separierung und für das anschließende Recycling Verwertung eingesetzt werden können. Außerdem beschreibt der Forschungsbericht in den genannten Kapiteln Vor- und Nachteile einzelner Verfahrenstechniken (z. B. Energiebedarf, Verschleiß, Wirtschaftlichkeit, etc.). Die wissenschaftlich recherchierten Erkenntnisse führen jedoch nicht zu einer nach den Maßstäben des § 6 Abs. 2 S 2 KrWG erstellten Analyse des Lebensbilanzzyklus i.S.v. § 8 Abs. 1 S. 3 KrWG. Mit Recht werden deshalb in den vorangehenden Kapiteln des Forschungsberichts technische Verfahrensalternativen ausgeschieden, wenn es

ihnen an einem hinreichenden technischen Reifegrad fehlt, nicht jedoch wegen einer Verfehlung der Anforderungen des § 8 Abs. 1 S. 3 KrWG.

Hilfreich sind insoweit Vollzugshilfen für den verantwortlichen Anlagenbetreiber und für die zuständige Behörde auf der Grundlage der Erkenntnisse des Forschungsberichts, die erläutern, welche technischen Verfahrensmöglichkeiten bestehen und welche ermittelten Vor- und Nachteile dazu zu berücksichtigen sind. Als Vollzugshilfen können auch Veröffentlichungen der Bund-/Länderarbeitsgemeinschaften, insbesondere der LABO-Leitfaden „Anforderungen des Bodenschutzes an den Rückbau von WEA“, 2021 sowie die DIN SPEC 4866 „Nachhaltiger Rückbau, Demontage, Recycling und Verwertung von Windenergieanlagen“ dienen.

Die Nachsorgepflichten für den Rückbau einer WEA nach ihrer Stilllegung und die Entsorgung der dabei anfallenden Abfälle sind grundsätzlich bereits Gegenstand des für die Errichtung und den Betrieb der WEA notwendigen Genehmigungsverfahrens (Jarass, 2020, § 5 BImSchG Rn. 111; Krahnefeld/Conzelmann, 2016, S. 16). Allerdings wird darauf hingewiesen, dass zwischen den sich aus § 5 Abs. 3 BImSchG für den Zeitraum vor der Betriebseinstellung ergebenden Pflichten und den auf den Zeitraum während bzw. nach der Einstellung bezogenen Pflichten zu unterscheiden ist. Nachsorgepflichten können aus der Natur der Sache im Genehmigungsverfahren zumeist und insbesondere bei langen Betriebsdauern noch nicht abschließend überblickt werden. Der Betreiber hat zwar schon mit Betriebsaufnahme sicherzustellen, dass nach einer Betriebseinstellung keine schädlichen Umwelteinwirkungen von der Anlage ausgehen, dass Abfälle ordnungsgemäß entsorgt werden können und dass das Betriebsgelände wiederhergestellt werden kann. Die Erfüllung dieser Pflicht kann im Rahmen des Genehmigungsverfahrens auch schon mit entsprechenden Nebenbestimmungen sichergestellt werden (Jarass, 2020, § 5 BImSchG Rn. 110). Für Nachsorgemaßnahmen nach der Einstellung sind jedoch Nebenbestimmungen und Auflagen in der Genehmigung zumeist nicht ausreichend, weil sich Einzelheiten der späteren Entsorgung noch nicht abschließend planen lassen. Nachsorgeanordnungen gem. § 17 BImSchG sind insoweit häufig geeigneter bzw. ergänzend notwendig. Wegen der Unüberschaubarkeit des möglicherweise sehr langen Betriebszeitraums kann von dem (zukünftigen) Betreiber nicht verlangt werden, mit den Antragsunterlagen bereits abschließend detaillierte Konzepte für die Entsorgung oder gar entsprechende Entsorgungsverträge vorzulegen (Dietlein, 2014, § 5 BImSchG Rn. 213; Jarass, 2020, § 5 BImSchG Rn. 111).

7.5.3 Getrenntsammlung

Soweit es zur Erfüllung der Anforderungen nach § 7 Abs. 2 bis 4 und § 8 Abs. 1 KrWG erforderlich ist, sind Abfälle gem. § 9 Abs. 1 KrWG getrennt zu sammeln und zu behandeln. Im Rahmen der Behandlung sind unter den in § 9 Abs. 1 KrWG genannten Voraussetzungen gem. § 9 Abs. 2 KrWG gefährliche Stoffe, Gemische oder Bestandteile aus den Abfällen zu entfernen und nach den Anforderungen dieses Gesetzes zu verwerten oder zu beseitigen.

Eine getrennte Sammlung von Abfällen ist nach § 9 Abs. 3 KrWG nicht erforderlich, wenn 1. die gemeinsame Sammlung der Abfälle deren Potential zur Vorbereitung zur Wiederverwendung, zum Recycling oder zu sonstigen Verwertungsverfahren unter Beachtung der Vorgaben des § 8 Abs. 1 KrWG nicht beeinträchtigt und wenn in diesen Verfahren mit einer gemeinsamen Sammlung verschiedener Abfallarten ein Abfallstrom erreicht wird, dessen Qualität mit dem Abfallstrom vergleichbar ist, der mit einer getrennten Sammlung erreicht wird, 2. die getrennte Sammlung der Abfälle unter Berücksichtigung der von ihrer Bewirtschaftung ausgehenden

Umweltauswirkungen den Schutz von Mensch und Umwelt nicht am besten gewährleistet, 3. die getrennte Sammlung unter Berücksichtigung guter Praxis der Abfallsammlung technisch nicht möglich ist oder 4. die getrennte Sammlung im Vergleich zur gemeinsamen Sammlung für den Verpflichteten unverhältnismäßig hohe Kosten verursachen würde; dabei sind zu berücksichtigen: a) die Kosten nachteiliger Auswirkungen auf Mensch und Umwelt, die mit einer gemeinsamen Sammlung und der nachfolgenden Behandlung der Abfälle verbunden sind, b) die Möglichkeit von Effizienzsteigerungen bei der Abfallsammlung und -behandlung und c) die Möglichkeit, aus der Vermarktung der getrennt gesammelten Abfälle Erlöse zu erzielen.

Soweit Abfälle zur Vorbereitung zur Wiederverwendung oder zum Recycling getrennt gesammelt worden sind, ist eine energetische Verwertung nach § 9 Abs. 4 KrWG nur zulässig für die Abfallfraktionen, die bei der nachgelagerten Behandlung der getrennt gesammelten Abfälle angefallen sind, und nur soweit die energetische Verwertung dieser Abfallfraktionen den Schutz von Mensch und Umwelt unter Berücksichtigung der in § 6 Abs. 2 Satz 2 und 3 KrWG festgelegten Kriterien am besten oder in gleichwertiger Weise wie die Vorbereitung zur Wiederverwendung oder das Recycling gewährleistet. § 7 Abs. 4 KrWG gilt entsprechend.

Für die Entsorgung von Rotorblattabfällen kann sich eine Pflicht zur getrennten Sammlung auch aus der GewAbfV und der ErsatzbaustoffV ergeben. § 24 Abs. 1 ErsatzbaustoffV sieht vor, dass Erzeuger und Besitzer die in § 2 Nr. 18 bis 33 ErsatzbaustoffV bezeichneten mineralischen Stoffe und Gemische im Sinne des § 2 Nr. 2 ErsatzbaustoffV, die als Abfälle bei Rückbau, Sanierung oder Reparatur technischer Bauwerke anfallen, untereinander und von Abfällen aus Primärbaustoffen getrennt zu sammeln, zu befördern und nach Maßgabe des § 8 Abs. 1 S. 1 KrWG vorrangig der Vorbereitung zur Wiederverwendung oder dem Recycling zuzuführen haben.

Der Abschlussbericht der LAGA zur Entsorgung faserhaltiger Abfälle empfiehlt eine Getrennthaltung carbonfaserhaltiger Abfälle für mengenmäßig relevante Anwendungsgebiete (Produktionsabfälle, Luftfahrt, Militär, Seefahrt, WEA, Altfahrzeuge), damit diese Stoffströme mit Hilfe spezieller Verfahren umweltverträglich entsorgt werden können (LAGA-Abschlussbericht, 2019, S. 31). Auch für glasfaserhaltige Abfälle aus WEA empfiehlt die LAGA eine solche Getrenntsammlung. Auch die faserhaltigen Fraktionen der Rotorblattabfälle sollten dementsprechend im Rahmen der Aufbereitung separiert und getrennt gesammelt und verwertet werden.

7.5.4 Vermischungsverbot

Die Vermischung, einschließlich der Verdünnung, gefährlicher Abfälle mit anderen Kategorien von gefährlichen Abfällen oder mit anderen Abfällen, Stoffen oder Materialien ist nach § 9 a Abs. 1 KrWG unzulässig. Abweichend davon ist eine Vermischung ausnahmsweise zulässig, wenn

1. sie in einer nach diesem Gesetz oder nach dem BImSchG hierfür zugelassenen Anlage erfolgt,
2. die Anforderungen an eine ordnungsgemäße und schadlose Verwertung nach § 7 Abs. 3 KrWG eingehalten werden und schädliche Auswirkungen der Abfallbewirtschaftung auf Mensch und Umwelt durch die Vermischung nicht verstärkt werden und
3. das Vermischungsverfahren dem Stand der Technik entspricht.

Das Vermischungsverbot des § 9 a KrWG bezieht sich auf gefährliche Abfälle. Für die Entsorgung von Rotorblättern ist es nur dann beachtlich, wenn und soweit die Rotorblätter auch gefährliche Abfälle enthalten. Der Abschlussbericht zur Entsorgung faserhaltiger Abfälle schließt, wie sich

aus seiner Empfehlung zur Abfallschlüsselung ergibt, die Einordnung von Rotorblattabfällen als gefährliche Abfälle nicht aus, soweit nämlich das Vorhandensein von Eigenschaften anzunehmen ist, die in Anhang III der Richtlinie 2008/98/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 19. November 2008 über Abfälle und zur Aufhebung bestimmter Richtlinien (ABl. L 312 vom 22.11.2008, S. 3, L 127 vom 26.5.2009, S. 24), die durch die Verordnung (EG) Nr. 1357/2014 (ABl. L 365 vom 19.12.2014, S. 89) geändert worden ist, in der jeweils geltenden Fassung aufgeführt sind (§ 3 Abs. 2 S. 1 AVV).

7.6 Behördliche Überwachung der Entsorgung von Rotorblättern

§ 5 Abs. 3 Nr. 3 BImSchG verpflichtet – wie im Einzelnen bereits erläutert – auch zum Rückbau der WEA. Zur Sicherung der Nachsorgepflichten und der dabei zu beachtenden Anforderungen des § 7 Abs. 2 KrWG kann die zuständige Immissionsschutzbehörde bei den immissionsschutzrechtlich genehmigten WEA eine nachträgliche Anordnung erlassen (§ 17 Abs. 1 i.V.m. Abs. 4a Satz 2 BImSchG). Die Voraussetzungen des § 20 Abs. 2 BImSchG für die Anordnung einer Beseitigung der Anlage dürften beim Fall der Nutzungsaufgabe einer WEA nicht vorliegen, da die Nutzungsaufgabe keine der drei geforderten Handlungen (Errichtung, Betrieb, oder wesentliche Änderung) der Vorschrift darstellt (UBA-Abschlussbericht 117/2019, S. 54).

Die Einhaltung der auf die Entsorgung von Abfällen bezogenen Betreiberpflichten ist von der Immissionsschutzbehörde zu überwachen. Sie muss sich bereits durch den Genehmigungsantrag des Anlagenbetreibers erläutern lassen, welche Abfälle bei der Anlage und mit Blick auf § 5 Abs. 3 BImSchG auch hinsichtlich der bei der Stilllegung anfallenden Abfälle anfallen werden, welche Maßnahmen zur Vermeidung und Verwertung von Abfällen vorgesehen sind. Zeigt der Betreiber der WEA an, dass er seine Anlage stilllegen wird, kann die Immissionsschutzbehörde durch nachträgliche Anordnungen auch Einfluss auf die Art und Weise der Entsorgung der bei der Demontage anfallenden Rotorblattabfälle nehmen.

Bei nicht immissionsschutzrechtlich genehmigungsbedürftigen WEA wird die Einhaltung der Anforderungen des § 22 BImSchG zwar ebenfalls von der Immissionsschutzbehörde überwacht (§ 52 BImSchG). Da sich § 22 Abs. 1 Nr. 3 BImSchG aber nur auf die Abfallbeseitigung bezieht, obliegt der Vollzug von Pflichten, die sich auf die Vermeidung oder Verwertung von Abfällen beziehen, der Abfallbehörde (Müggenborg, 2019, § 13 KrWG Rn. 29 f).

Für die Überwachung der weiteren Anforderungen des Kreislaufwirtschaftsrechts, zu denen das Immissionsschutzrecht keine eigenen Regelungen vorhält, bleibt die Abfallbehörde zuständig. Dazu wird die Auffassung vertreten, dass das für den gesamten Vorgang der externen Abfallentsorgung gelten soll. Die Art und Weise der Demontage der Rotorblätter vor Ort wäre insoweit zwar noch von der Immissionsschutzbehörde, die externe Entsorgung der am Betriebsstandort der WEA zerlegten Rotorblätter hingegen von der Abfallbehörde zu überwachen (Müggenborg, 2019, § 13 KrWG Rn. 29 f.). Dem wird allerdings entgegen gehalten, dass die Betreiberpflichten des § 5 Abs. 1 Nr. 3 BImSchG nicht nur bei anlageninterner Verwertung beachtlich sind; erfasst würde vielmehr auch der Fall, bei dem Produktionsabfälle anlagenextern verwertet werden (Mann 2019, 2019, § 13 KrWG Rn. 10; Dietlein, 2014, § 5 BImSchG Rn. 175 f.; zur strittigen Reichweite der Pflichten bei externer Verwertung s. Krahnefeld/Conzelmann, 2014, S. 3 ff.).

7.7 Normkonkretisierung und -ergänzung

Fraglich ist, ob es ratsam ist, die sich aus den §§ 6-8 KrWG und § 5 Abs. 3 Nr. 2 BImSchG sowie den einschlägigen Rechtsverordnungen auf hohem Abstraktionsniveau ergebenden materiell-rechtlichen Anforderungen an die Entsorgung von Rotorblattabfällen zu konkretisieren und, bejahendenfalls, in welcher Rechtsform dies geschehen sollte. Geprüft werden soll außerdem, ob Empfehlungen sinnvoll sind, verfahrensrechtliche Ergänzungen zur Qualifizierung der in Frage kommenden Entsorgungs- und Aufbereitungsbetriebe sowie zur behördlichen oder betrieblichen Eigen- oder Fremdüberwachung einzuführen.

Ein erster und wichtiger Schritt auf dem Weg zur Sicherung einer ordnungsgemäßen, schadlosen und hochwertigen Verwertung der Rotorblattabfälle ist sicher unabhängig von einer Rechtsänderung oder einer verbindlichen Normkonkretisierung die Verbesserung der Informationslage für alle Beteiligten, die unter anderem auch durch diesen Forschungsbericht und durch ergänzende Informationen der Hersteller und Vertreiber freiwillig oder auf Grundlage von ergänzenden Informationspflichten bewirkt werden kann.

Ein zweiter Schritt für die erfolgeiche Verwertung der Rotorblattabfälle ist die technische Standardisierung von Entsorgungsmöglichkeiten nach dem Modell der DIN SPEC 4866, die zwar keine Verbindlichkeit beanspruchen kann, die sich aber an Betreiber- und Rückbauunternehmen richtet und im Sinne einer Arbeitshilfe für diese Unternehmen bzw. als Vollzugshilfe für die zuständigen Behörden beschreibt, wie eine geordnete Planung eines Rückbauvorhabens ablaufen kann. Ergänzend dazu können weitere Regelwerk baustellenseitige Zerkleinerungsverfahren von Rotorblattabfällen und Aufbereitungsverfahren beschreiben sowie Anforderungen an diese Verfahren mit dem Ziel zu formulieren, auch dafür einen Stand der Technik zu beschreiben. Wiederum ergänzend dazu können in einem Leitfaden Anforderungen der Pyrolyse-, Glaswerk- und Zementwerkbetreiber an den vorbehandelten Abfall (z. B. Störstoffanteil, Heizwert) formuliert werden, um eine reibungslose und störungsfreie Entsorgung zu ermöglichen.

7.7.1 Materiell-rechtliche Ergänzungen/Konkretisierungen

Erörterungsbedürftig ist, ob und inwieweit für die Aufbereitung und Verwertung von Rotorblättern untergesetzlich detailliertere Vorgaben erforderlich sind. Dazu kommen verschiedene Regelungsansätze in Betracht, so z. B. Vorgaben für ein mehrstufiges Entsorgungsverfahren, ergänzende Grenzwerte für gefährliche Stoffe, Recyclingziele für einzelne Fraktionen der Rotorblätter, zusätzliche Trennungsvorgaben, Anforderungen an den Umgebungsschutz am Ort des Rückbaus (Lärm, Boden-, Gewässer- und Naturschutz, Arten- und Gebietsschutz), Anforderungen an die Zwischenlagerung und Beseitigung der Restfraktion und ggfs. auch für die Lagerung wiederverwendbarer Rotorblätter oder Teilen davon, Festlegung bestimmter Entsorgungswege, z. B. der stofflichen oder energetischen Verwertung insbesondere der Pyrolyse, der Klinkerherstellung, etc.).

Betreiber von Demontage-, Aufbereitungs- und Verwertungsbetrieben, die Rotorblätter entsorgen, könnten durch eine Verordnung verpflichtet werden, weitergehende Anforderungen zu erfüllen, die in einem untergesetzlichen Regelwerk geregelt werden. Solche Anforderungen können sich auf die Sach- und Fachkunde des Personals, auf die technische Ausstattung des Betriebs (z. B. Untergrundabdichtungen, Absaugeinrichtungen, etc.), auf Platzgrößen, Einfriedung, Eingangskontrolle, Dokumentation, etc. beziehen.

Darüber hinaus könnte der Verordnungsgeber Vorgaben für die Verwertung faserhaltiger Fraktionen der Rotorblattabfälle machen. Er könnte, abhängig von den Ergebnissen weiterer Untersuchungen, z. B. vorschreiben, dass

1. CFK-haltige Abfälle nicht in Abfallverbrennungsanlagen eingesetzt und nicht oder nur unter bestimmten Voraussetzungen in Zementöfen energetisch verwerten werden, und
2. dass eine Verunreinigung anderer Abfallströme (Restabfall/Kunststoffabfälle) vermieden werden muss.

7.7.2 Grenzwert für die Freisetzung von Fasern

Ob und inwieweit es noch der Festsetzung ergänzender Schadstoffwerte bedarf, sollte Gegenstand weiterer Forschung sein, z. B. im Zusammenhang mit lungengängigen Carbonfaser-Fragmenten mit WHO-Geometrie und zur Entstehung lungengängiger Faserfragmente bei der mechanischen Aufbereitung sowie zur Freisetzung von Titandioxid bei der Entsorgung von lackierten und beschichteten Rotorblättern.

Bei der Demontage und Zerkleinerung der Rotorblätter am Betriebsstandort der WEA, bei der Aufbereitung am Standort eines Entsorgungsfachbetriebs und schließlich auch am Standort der Endverwertungsanlage können Emissionen freigesetzt werden, die zu Risiken für die Arbeitsplatzsicherheit und für die Umwelt führen können. Unter 3.5.2 wird erläutert, dass es für Carbonfasern noch keinen stoffspezifischen Grenzwert gibt. Es würden je nach Betrachtungsweise unterschiedliche Richtlinien herangezogen und zu unterschiedlichen Einordnungen der Hersteller in deren Sicherheitsdatenblättern, wobei sich diese Einordnung wohl zumeist auf Arbeitsplatzgrenzwerte, nicht auf Umweltgefahren bezogene Emissionsgrenzwerte bezieht. Mangels einer unmittelbar einschlägigen TRGS empfiehlt die Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin für lungengängige Carbonfasern eine Orientierung an einem TRGS-Regelwerk für Mineralwolle, ohne dass wissenschaftlich belegt wäre, ob sich die Gleichsetzung von carbonfaserhaltigen Abfällen und Mineralwolle mit Blick auf den Arbeitsschutz rechtfertigen lässt.

Es geht aber nicht nur um Arbeitsplatzsicherheit, sondern auch die Vermeidung von Umweltgefahren (siehe Nr.3.5.5), soweit ein Eintrag von Carbonfasern und Carbonfaserfragmenten in Böden und Gewässer möglich ist. Das betrifft nicht nur die faserhaltigen Abfälle, sondern möglicherweise auch die verwendeten Harze.

Solange Gesundheitsgefahren durch lungengängigen Carbonfasern als krebserzeugende Stoffe nicht ausgeschlossen werden können, liegt deshalb die Empfehlung nahe, entsprechende Grenzwerte sowohl mit Blick auf den Arbeitsschutz als auch mit Blick auf Umweltgefahren durch emittierte Fasern festzulegen.

Soweit zur Festlegung solcher Grenzwerte weiterer Forschungsbedarf besteht, kann der dazu erforderliche Zeitraum dadurch überbrückt werden, dass der Verordnungsgeber vorsorglich verbindlich vorschreibt, in welcher Weise die Freisetzung lungengängiger Fasern in die Umwelt und am Arbeitsplatz zu verhindern ist.

Zur Verwendung einer Bandsäge für die Zerkleinerung der Rotorblätter am Betriebsort der stillgelegten WEA wird z. B. unter 3.6.3 empfohlen, dass diese nur bei geeigneten Rückhaltemaßnahmen (Einhausung, gekoppelt mit einer Wasserspülung, deren Abwässer aufgefangen und einer entsprechenden Aufbereitung zugeführt werden) zum Einsatz kommen

dürfe. Maßnahmen des Arbeitsschutzes (z. B. die Verwendung von Schutzkleidung, Schutzmasken) sind nicht unbedingt geeignet, Schadstofffreisetzungen in die Umwelt zu verhindern.

7.7.3 Vorgaben für mehrstufige Demontage-, Aufbereitungs- und Verwertungsverfahren

In einem untergesetzlichen Regelwerk (Verordnung auf Grundlage des § 10 KrWG, Technische Anleitung) könnte vorgeschrieben bzw. empfohlen werden, bestimmte Anforderungen zum Schutz der Umwelt und der Nachbarschaft bei der Demontage der Rotorblätter, der Bereitstellung der Rotorblätter für den Abtransport, an eine Zerkleinerung der Rotorblätter noch am Standort der stillgelegten WEA, an das Trennen oder Vorsortieren einzelner Fraktionen, an eine ggfs. notwendige Zwischenlagerung der Rotorblattabfälle, an eine Aufbereitung und schließlich an die Verwertung einzelner Stofffraktionen zu richten.

Die DIN SPEC 4866 sieht vor, dass die Rotorblätter vor Ort zerkleinert werden, um Schwertransporte zu vermeiden, soweit sie nicht wiederverwendet oder zur Wiederverwendung vorbereitet werden. Empfohlen wird außerdem, beim Schneiden von Rotorblättern vor Ort darauf zu achten, dass keine Schadstoffe in die Umwelt gelangen können. Dies gilt nach der DIN SPEC 4866 sowohl für GFK-als auch für CFK-haltige Rotorblattabfälle. Weiter sieht die DIN SPEC 4866 vor, dass Sägemehl aufzufangen und fachgerecht zu entsorgen ist und dass geeignete emissionsreduzierende Verfahren gewählt werden. Diese Anforderungen könnten in eine außenverbindliche Rechtsverordnung oder in eine normkonkretisierende VV übernommen werden, da es einer DIN SPEC an Verbindlichkeit für Behörden, Anlagenbetreiber und Gerichte fehlt.

Denkbar ist auch eine ergänzende untergesetzliche Regelung in einer Verordnung nach § 10 Abs. 2 S. 1 Nr. 2, S. 2 KrWG ähnlich zu § 20 ElektroG. Vorgeschrieben werden könnte darin, dass

- Rotorblätter vor der Durchführung weiterer Verwertungs- und Beseitigungsmaßnahmen einer Erstbehandlung zuzuführen sind,
- vor der Erstbehandlung zu prüfen ist, ob das Rotorblatt oder einzelne seiner Bauteile einer Vorbereitung zur Wiederverwendung zugeführt werden können,
- eine solche Prüfung aber nur durchzuführen ist, soweit sie technisch möglich und wirtschaftlich zumutbar ist,
- die Erstbehandlung und weitere Behandlungstätigkeiten nach dem Stand der Technik im Sinne des § 3 Abs. 28 KrWG durchgeführt werden.
- Besonders effizient und vollzugstauglich würden diese Vorgaben, wenn der Stand der Technik der Aufbereitung und Verwertung der Rotorblätter in einer Verordnung oder in einem begleitenden Regelwerk, auf das verwiesen werden könnte, näher konkretisiert würde. Dies gilt auch für Handlungsempfehlungen, die in Kapitel 5 zur Aufbereitungstechnik aufgelistet werden:
- Zwingend notwendig für die Aufbereitung von Faserverbundkunststoffen ist eine sortenreine, ggfs. auch händische Metallabtrennung, um zu gewährleisten, dass keine Fe- und NE-Metalle mehr im GFK-, bzw. CFK-Materialstrom zu finden sind.

- Regelmäßig bedarf es nur zwei Zerkleinerungsstufen, um FVK von Rotorblättern auf eine verwertbare Korngröße zu bringen. Ausnahme ist jedoch die Verwertung der Rezyklate zu Füllstoffen, bzw. Kurz-Rezyklat-Fasern, die eventuell mindestens eine weitere Zerkleinerungsstufe benötigt.
- Schnelllaufende Zerkleinerungsmaschinen sollten aufgrund der erhöhten Staublastemissionen eingehaust werden.
- Sinnvoll ist eine Wasserbedüsung oder eine Entstaubungsanlage. Das gilt nicht bei der Zementroute, da die Stäube mit feuchten Spuckstoffen relativ gut gebunden werden können.
- Die Aufbereitung sollte in zertifizierten Recyclingunternehmen stattfinden, um Emissionen zu reduzieren.

7.7.4 Verfahrensrechtliche Ergänzungen

Neben einer Konkretisierung materiell-rechtlicher Anforderungen an die Demontage der Rotorblätter, die Zerlegung, Aufbereitung und Verwertung der Rotorblattabfälle stellt sich die Frage, ob und inwieweit verfahrensrechtliche Ergänzungen empfehlenswert sind. In Betracht kommen unter anderem Vorgaben zu einer ergänzenden betrieblichen Eigen- und Fremdkontrolle, eine ergänzende Zertifizierung von Entsorgungsfachbetrieben, eine eigenständige Abfallschlüsselung von Rotorblattabfällen oder von faserhaltigen Abfällen, ein generelles Nachweisverfahren auch für nicht gefährliche Rotorblattabfälle bzw. für deren carbon- und glasfaserhaltigen Fraktionen.

Bei all diesen verfahrensrechtlichen Ergänzungsmöglichkeiten ist jedoch zu bedenken, dass die Entsorgung der Rotorblattabfälle in aller Regel auch derzeit bereits bei zertifizierten Entsorgungsfachbetrieben stattfindet, dass auch schon andere Regelwerke (z. B. die Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMUV)) Anforderungen an die Überwachung, Dokumentation, etc. richten. Jedes zusätzliche Verfahrensinstrument löst weiteren Aufwand aus, der am Ende auch die Wirtschaftlichkeit der förderungswürdigen Windenergienutzung betrifft. Der Verordnungsgeber bzw. der Normgeber wird sich deshalb zur Beachtung des Grundsatzes der Verhältnismäßigkeit und im Rahmen des ihm zustehenden Ermessens fragen, ob und inwieweit ein zusätzlicher Verfahrensaufwand notwendig ist, um eine ordnungsgemäße, schadlose und hochwertige Verwertung der Rotorblätter zu sichern.

7.7.4.1 Ergänzende Zertifizierung von Entsorgungsfachbetrieben

Der Verordnungsgeber kann bestimmen, dass Betreiber von Demontage-, Aufbereitungs- und Verwertungsbetrieben, die Rotorblätter entsorgen, bestimmte Anforderungen zu erfüllen haben, die im Anhang einer Verordnung oder in einem anderen untergesetzlichen Regelwerk, auf das verwiesen werden kann, erfüllen müssen.

Diese Anforderungen können sich auf die Sach- und Fachkunde des Personals, auf die technische Ausstattung des Betriebs (z. B. Untergrundabdichtungen, Absaugeinrichtungen, etc.), auf Platzgrößen, Einfriedung, Eingangskontrolle, Dokumentation, etc. beziehen.

Es kann auch vorgeschrieben werden, dass die Einhaltung der Anforderungen durch einen Sachverständigen bestimmter Qualifikation regelmäßig geprüft und zertifiziert wird.

Da die in Betracht kommenden Entsorgungsbetriebe überwiegend bereits zertifizierte Entsorgungsfachbetriebe sein dürften, kommt vor allem eine ergänzende Zertifizierung in

Betracht. Es kann vorgesehen werden, dass das Zertifikat nur erteilt werden darf, wenn in der Anlage die Durchführung der Tätigkeiten einer entsprechenden Aufbereitung möglich ist, wenn die Anlage technisch geeignet ist und der Betreiber der Anlage ein Behandlungskonzept vorlegt, das den durch den Verordnungsgeber näher konkretisierten Anforderungen genügt.

Der Abschlussbericht 117/2019 (S. 199) bringt in Anlehnung an die Zertifizierung von Entsorgungsfachbetrieben nach den §§ 56, 57 KrWG eine Zertifizierung von Rückbau-Unternehmen in Anlehnung an einen bestimmten Rückbau-Standard ins Gespräch. Auch eine Zertifizierung von Entsorgungsunternehmen, die bestimmte Komponenten der WEA verwerten, sei grundsätzlich denkbar. Dennoch sollte der erforderliche bürokratische Aufwand geprüft werden und mit einem möglichen Nutzen ins Verhältnis gesetzt werden. Dazu bestehe weiterer Forschungsbedarf (Umweltbundesamt, Abschlussbericht 117/2019, S. 199).

Gem. § 4 Abs. 2 Satz 1 EfbV müssen Entsorgungsfachbetriebe über ausreichendes Personal verfügen; mit dem vorhandenen Personal muss einfach - unter sachgerechter Betriebsablauf sichergestellt werden können. Der Inhaber des Entsorgungsfachbetriebs, soweit er für die Leitung und Beaufsichtigung des Betriebes verantwortlich ist, und die für die Leitung und Beaufsichtigung des Betriebes verantwortlichen Personen müssen gemäß § 9 Abs. 1 EfbV die für ihren Tätigkeitsbereich erforderliche Fachkunde besitzen. Nach § 4 Abs. 4 EfbV hat ein Entsorgungsfachbetrieb an jedem zu zertifizieren Standort und für jede zu zertifizierende Tätigkeit über die gerätetechnische Ausstattung und über die sonstigen Betriebsmittel zu verfügen, die zur -fach- und sachgerechten Ausführung der abfallwirtschaftlichen Tätigkeiten notwendig sind. Der Entsorgungsfachbetrieb hat gem. § 7 Abs. 1 S. 1 EfbV die für seine abfallwirtschaftliche Tätigkeit geltenden öffentlich-rechtlichen Vorschriften zu beachten. Der Inhaber hat gem. § 7 Abs. 1 S. 2 EfbV den Nachweis zu erbringen, dass die für die abfallwirtschaftliche Tätigkeit des Entsorgungsfachbetriebes erforderlichen behördlichen Entscheidungen, insbesondere Planfeststellungen, Genehmigungen, Zulassungen, Erlaubnisse und Bewilligungen, vorliegen und die mit ihnen verbundenen Auflagen und sonstigen Anordnungen der zuständigen Behörden erfüllt werden.

Der Entsorgungsfachbetrieb kann seine Fachbetriebstätigkeit, für die er zertifiziert wird, auf bestimmte Abfallarten oder Abfälle aus bestimmten Herkunftsbereichen, für bestimmte Verwertungs- oder Beseitigungsverfahren oder für bestimmte Standorte beschränken (§ 24 Abs. 2 S. 1 EbfV). Dementsprechend könnte der Verordnungsgeber regeln, dass faserhaltige Abfälle (von Rotorblättern der WEA) nur in Entsorgungsfachbetrieben verwertet oder beseitigt werden dürfen, die für die Behandlung, Verwertung oder Beseitigung solcher Abfälle zertifiziert sind. In einer entsprechenden Verordnung könnten ergänzend auch Anforderungen an die personelle/technische Ausstattung dieser Betriebe formuliert werden.

Zu unterscheiden ist zwischen dem Rückbau und der Demontage der WEA vor Ort, der vorbereitenden Aufbereitung und der endgültigen Verwertung einzelner Fraktionen und ggfs. auch noch einer sich anschließenden Beseitigung von Restfraktionen, da für die einzelnen Nachsorge- und Entsorgungsschritte unterschiedliche technische Fähigkeiten gefragt sind.

Eine Ablagerung von CFK-haltigen Rotorblattabfällen scheidet aufgrund des hohen Brennwerts der Kunststoffmatrix nach Anhang 3 Nr. 2 Satz 11 DepV aus (siehe dazu LAGA-Abschlussbericht, 2019, S. 28). Abweichendes könnte sich jedoch nach der Einschätzung der LAGA dann ergeben, wenn Carbonfasern als gefährliche Fasern im Sinne von § 6 Abs. 6 S. 2 Nr. 1 DepV eingestuft

werden und der Nachweis erbracht würde, dass eine Abtrennung der Fasern technisch nicht möglich oder wirtschaftlich nicht zumutbar ist. Eine Deponierung trockener Fasern ist nach dem Abschlussbericht der LAGA, 2019 (S. 28) grundsätzlich zulässig, kommt aber wegen des Vorrangs der Verwertung nur dann in Betracht, wenn keine vorzugswürdige Verwertungsalternative vorhanden ist oder wenn der Verwertungsvorrang nach § 7 Abs. 2 S. 3 KrWG entfällt, weil die Beseitigung des Abfalls den Schutz von Mensch und Umwelt am besten gewährleistet. Bei einer solchen Ablagerung von faserhaltigen Abfällen sollten allerdings nach Ansicht der LAGA bestimmte Einbaubedingungen beachtet werden.

Insbesondere bei der abschließenden Entsorgung der faserhaltigen Abfälle stellt sich die Frage, ob eine spezielle Zertifizierung sich auf die Entsorgung von faserhaltigen Rotorblattabfällen beschränken kann oder auf faserhaltige Abfälle auch aus anderen Herkunftsbereichen erstreckt werden muss. Geht man davon aus, dass faserhaltige Abfälle aus verschiedenen Herkuftsbereichen in denselben Aufbereitungs- und Verwertungsanlagen entsorgt werden können und sollen, dann spricht dies dafür, eine ergänzende Zertifizierung auf faserhaltige Abfälle zu erstrecken.

7.7.4.2 Neue Abfallschlüssel?

Nimmt man an, dass für Rotorblattabfälle oder für Teilfraktionen davon ein spezifischer Entsorgungsweg notwendig wird und dass diese Abfälle auch nur in bestimmten Anlagen bzw. Entsorgungsfachbetrieben entsorgt werden sollen bzw. dürfen, dann könnte man für solche Abfälle neue Abfallschlüssel vorsehen, die es ermöglichen, die Entsorgung solcher Abfälle transparenter zu überwachen und ihre Entsorgung bestimmten, dafür speziell zugelassenen Anlagen vorzubehalten.

Die LAGA (LAGA-Abschlussbericht zur Entsorgung faserhaltiger Abfälle, 2019, S. 32) empfiehlt dazu eine Festlegung separater Abfallschlüssel für Carbonfasern, für Carbonfasern in einer Kunststoffmatrix und für Carbonfasern in einer mineralischen Matrix, jeweils ergänzt um einen eigenen Abfallschlüssel für gefährliche Abfälle sowie für eine Anpassung des Europäischen Abfallverzeichnisses und für eine Aufnahme der neuen Schlüssel in die AVV (in einer neuen Gruppe in Kapitel 16 und in Gruppe 1709), um eine getrennte Erfassung und Entsorgung sicherzustellen. Bis geeignete spezifische Abfallschlüssel für Carbonfasern bzw. carbonfaserhaltige Verbundwerkstoffe in der AVV zur Verfügung stehen, müssten hilfsweise andere Abfallschlüssel herangezogen werden, die am ehesten die Herkunft der Abfälle beschreiben. Dabei sollte – so die LAGA – der Zusatz „enthält Carbonfasern“ immer zwingend mit aufgeführt werden. Die LAGA empfiehlt neben dem bestehenden Abfallschlüssel für Glasfaserabfall (10 11 03), ergänzende Schlüssel für Glasfasern in Kunststoffmatrix und für Glasfasern in mineralischer Matrix, wiederum jeweils ergänzt um einen Abfallschlüssel für gefährliche Abfälle.

Abfallschlüssel für faserhaltige Abfälle können sich auf demontierte Rotorblätter, auf die für den Abtransport getrennten Teile solcher Rotorblätter und auf die nach Aufbereitung verbleibenden Stücke der noch mit der Matrix verbundenen Fasern beziehen. Soweit andere Fraktionen, etwa Metall und Balsaholz davon getrennt werden können, entstehen neue Abfälle, für die ein sich auf die genannten Fasern beziehender Abfallschlüssel nicht mehr verwendet werden kann.

Mit Hilfe neuer Abfallschlüssel könnten faserhaltige Rotorblattabfälle auch in bestimmte Anlagen gesteuert werden, wenn nämlich diese Schlüssel nur in den Positivkatalog dafür

geeigneter Anlagen aufgenommen werden oder wenn abstrakt/generell geregelt wird, dass Abfälle mit diesen Schlüsseln nur in bestimmten Anlagen entsorgt werden dürfen. Der Ausschluss einer Entsorgung in bestimmten Anlagen setzt jedoch voraus, dass deren Eignung für diese Entsorgung nicht belegt werden kann. Zu bedenken ist außerdem, dass die Ergänzung bzw. Änderung genehmigter Positivkataloge für Anlagen, die bislang nicht für den neuen Abfallschlüssel genehmigt sind, einen zusätzlichen bürokratischen Aufwand auslösen. Gem. § 16 Abs. 1 BImSchG bedarf die Änderung des Betriebs einer immissionsschutzrechtlich genehmigungsbedürftigen Abfallbehandlunge einer Genehmigung. wenn durch die Änderung nachteilige Auswirkungen hervorgerufen werden können und diese für die Prüfung nach § 6 Abs. 1 Nr. 1 BImSchG erheblich sein können. Für in diesem Sinne unwesentliche Betriebsänderungen reicht eine Anzeige nach § 15 BImSchG. Ob eine Änderung des Positivkatalogs einer Abfallbehandlungsanlage danach einer Änderungsgenehmigung bedarf oder über eine Anzeige legalisiert werden kann, hängt u. a. davon ab, ob mit der Änderung des Positivkatalogs nur eine Änderung der Schlüsselbezeichnung von bereits positiv gelisteten Abfällen beabsichtigt ist oder tatsächlich weitere Abfälle angenommen werden sollen. Im letzteren Fall dürfte in aller Regel eine Genehmigung erforderlich werden.

Möglicherweise sind neue Abfallschlüssel für faserhaltige Abfälle, jedenfalls was Rotorblattabfälle angeht, nicht zuletzt im Sinne einer Vermeidung eines zusätzlichen Genehmigungsaufwands verzichtbar, wenn für die Rotorblätter eine Kennzeichnung eingeführt würde, aus der sich ergibt, ob und ggfs. welche Glas- und/oder Carbonfasern diese enthalten. Damit könnte vermieden werden, dass faserhaltige Rotorblattabfälle in Unkenntnis des Fasergehalts auf ungeeignetem Weg entsorgt werden. Erfolgversprechend wäre dies aber wohl nur, wenn parallel dazu auch verbindliche Vorgaben für den Umgang mit faserhaltigen Rotorblattabfällen gemacht werden.

7.7.4.3 Erweiterung der Nachweispflichten

Nach § 51 Abs. 1 S. 1 KrWG kann die zuständige Behörde anordnen, dass Erzeuger, Besitzer, Sammler, Beförderer, Händler, Makler oder Entsorger von Abfällen Register oder Nachweise führen und vorlegen, soweit Pflichten nach den §§ 49, 50 nicht bestehen, oder bestimmten Anforderungen entsprechend § 10 Abs. 2 Nr. 2 und 3 sowie 5 bis 8 nachzukommen haben. Der Abschlussbericht 117/2019 (Bl. 201) empfiehlt als weitere Überwachungsmöglichkeit, die Nachweispflichten aus § 50 KrWG auf der Grundlage des § 51 KrWG auf bestimmte nicht gefährliche Abfälle zu erweitern. Aus dem Wortlaut des § 51 Abs. 1 Satz 1 KrWG ergibt sich zwar nicht, dass die Anordnungen nach § 51 Abs. 1 S. 1 KrWG nur im Einzelfall und nicht grundsätzlich, d. h. abstrakt/generell, angeordnet werden dürfen. Dafür spricht aber, dass die Normadressaten grundsätzlich keinen Dokumentationspflichten unterliegen. Außerdem folgt die Beschränkung auf Einzelanordnungen aus der amtlichen Überschrift der Bestimmung, wobei auch Allgemeinverfügungen i. S. d. § 35 Satz 2 VwVfG in Betracht kommen (Beckmann, 2021, § 51 KrWG Rn. 5). Unzulässig sind demgegenüber Überwachungs- oder Nachweissysteme auf der Grundlage des § 51 Abs. 1 KrWG, die zeitlich unbegrenzt und landesweit eingeführt werden sollen (VG Potsdam, Beschl. v. 15. 10. 1999 – 4 L 725/98, NVwZ-RR 2000, 279, 280).

Nach § 10 Abs. 2 KrWG kann die Bundesregierung durch Rechtsverordnung auch bestimmen, dass Nachweise oder Register zu führen und vorzulegen sind, auch ohne eine Anordnung nach § 51 KrWG, oder abweichend von bestimmten Anforderungen nach den §§ 49 und 50 KrWG oder einer Rechtsverordnung nach § 52 KrWG, dass die Entsorger von Abfällen diese bei Annahme

oder Weitergabe in bestimmter Art und Weise zu überprüfen und das Ergebnis dieser Prüfung in den Nachweisen oder Registern zu verzeichnen haben. Weiter kann bestimmt werden, dass die Beförderer und Entsorger von Abfällen ein Betriebstagebuch zu führen haben, in dem bestimmte Angaben zu den Betriebsabläufen zu verzeichnen sind, die nicht schon in die Register aufgenommen werden, dass die Erzeuger, Besitzer oder Entsorger von Abfällen bei Annahme oder Weitergabe der Abfälle auf die Anforderungen, die sich aus der Rechtsverordnung ergeben, hinzuweisen oder die Abfälle oder die für deren Beförderung vorgesehenen Behältnisse in bestimmter Weise zu kennzeichnen haben.

Zu Recht mahnt jedoch schon der Abschlussbericht 117/2019 (S. 201), vor der Einführung ergänzender Überwachungspflichten die damit verbundenen bürokratischen Auflagen sorgfältig dem Nutzen gegenüberzustellen. Zu erinnern ist auch in diesem Zusammenhang daran, dass die Stilllegung der WEA gegenüber der Aufsichtsbehörde jeweils anzuzeigen ist, dass die Entsorgung der nach der Stilllegung der WEA entstehenden Abfälle nachzuweisen ist und dass insoweit die Entsorgungswege auch für die Rotorblattabfälle nachvollzogen werden können, sodass es, soweit es sich bei den Rotorblattabfällen nicht ohnehin um nachweispflichtigen, gefährlichen Abfall handelt, entbehrlich sein dürfte, zusätzliche Nachweispflichten auf diese nicht gefährlichen Abfälle zu erstrecken.

7.7.4.4 Vorgaben zur Berechnung der Sicherheitsleistung

Der Abschlussbericht 117/2019 hinterfragt zu Recht bereits die Methode zur Berechnung der Sicherheitsleistung für den Rückbau von WEA. Die Art und Weise der Berechnung könnte – so der Vorschlag – in einer Leitlinie oder auch in einer Verordnung konkretisiert und vereinheitlicht werden. Fraglich ist in der Tat, ob derzeitige Berechnungsgrundlagen, die sich an der Nabenhöhe der WEA oder an der installierten Leistung orientieren, eine hinreichend verlässliche Basis für die Kalkulation der Sicherheitsleistung sind. Der Abschlussbericht 117/2019 (S. 201) bringt dazu eine Einbeziehung auch der Investitionskosten ins Gespräch. Ob allerdings die Investitionskosten bei der Errichtung der WEA tatsächlich in einem bestimmten Verhältnis zu den Rückbaukosten stehen, ist zweifelhaft (siehe dazu bereits oben unter Abschnitt 7.3.1).

7.7.5 Rechtsänderung oder untergesetzliche Normkonkretisierung

Der Abschlussbericht 117/2019 empfiehlt die Einrichtung eines Bund-Länder-Arbeitskreises, z. B. innerhalb der Bund-Länder-Arbeitsgemeinschaft Immissionsschutz (LAI) oder Abfall (LAGA), in welchem unter Berücksichtigung der Erfahrungen der Genehmigungsbehörden Leitlinien für den Rückbau und die Verwertung von WEA erarbeitet werden sollen. Die Komplexität des Anlagenbestands, die abweichenden geologischen Gegebenheiten und die starke Position der Bundesländer sprächen für bundesweit abgestimmte Empfehlungen und Vollzugshilfen. Die zu erarbeitende Leitlinie solle Behörden und Anlagenbetreibern im Fall des Rückbaus Hilfe bieten und eine gute und umweltverträgliche Rückbaupraxis unterstützen. Technische Leitlinien Vollzugshilfen seien ein flexibles Instrument, könnten aber wirksame Vorgaben für die beteiligten Akteure unter Verweis auf bestehende Gesetze und Normen, z. B. zum Arbeitsschutz beim Rückbau, enthalten. Ein Erfolgsfaktor für eine solche Leitlinie sei es, dass diese auf einen allgemein anerkannten technischen Standard hinweisen könne, der auf einem Konsens zwischen den Beteiligten aufbaue (Abschlussbericht 117/2019, S. 198 f). Denkbar wäre es auch, eine solche Leitlinie als Verwaltungsvorschrift zu erlassen. Die Anforderungen des Bodenschutzes an

den Rückbau von Windenergieanlagen sind bereits in einem Leitfaden der LABO konkretisiert worden.

Der Abschlussbericht 117/2019 (S. 199) erläutert außerdem, dass bestimmte technische Details des Rückbaus und des Recyclings von WEA noch nicht standardisiert sind. Deshalb könnten Standardisierungsgremien entsprechende technische Standards erarbeiten. Leitlinien der Behörden könnten dann auf solche Standards verweisen und weiteren Normungsbedarf aufdecken. Hingewiesen wird insbesondere auf das Sägen und Zerkleinern von Rotorblättern, auf eine recyclinggerechte Konstruktion von Rotorblättern, auf Materialanforderungen für entstehende Stoffströme und auf Vorgaben zur Zwischenlagerung. Allerdings bestünden bereits für viele Arbeitsschritte Normen, die beachtet oder gegebenenfalls angepasst werden müssten. Hier bestehe weiterer Prüfungsbedarf. Damit wird ein Weg beschritten, der sowohl den für die Entsorgung verantwortlichen Anlagenbetreibern als auch den Überwachungsbehörden hilft, eine ordnungsgemäße, schadlose und hochwertige Verwertung der Rotorblattabfälle sicherzustellen.

Zahlreiche Bundesländer haben Windenergieerlasse veröffentlicht. Dabei handelt es sich um norminterpretierende, ausschließlich verwaltungsintern verbindliche Regeln; gesetzliche Regelungen gelten unabhängig davon. Gleichwohl ist die Bedeutung dieser Erlasse nicht zu unterschätzen (dazu Fest und Fechler 2016, S. 105, Saurer 2016, S. 201; Rectanus 2009, S. 874; Wegner 2017, S. 605). Sie dienen dem erheblichen Auslegungsbedarf für die Planungs- und Genehmigungspraxis angesichts einer Vielzahl unbestimmter Rechtsbegriffe, höchstrichterlich anerkannter fachbehördlicher Einschätzungsprärogativen, vorzunehmender Ermessensentscheidungen und landesspezifischer Besonderheiten im Hinblick auf bestimmte Gebietskategorien. Außerdem können sie über den Gleichheitsgrundsatz des Art. 3 GG eine Selbstbindung der Verwaltung dort bewirken, wo ihr ein Entscheidungsspielraum zusteht.

Bislang stehen zwei Regelungsschwerpunkte der Windenergieerlasse im Vordergrund, nämlich die Abstandsregelungen und die Regelungen zum Artenschutz (dazu Saurer, 2016, S. 201; Schwarzenberg und Ruß 2016, S. 278). Die Windenergieerlasse könnten allerdings auch Anforderungen an das Recycling von Rotorblätter Abfällen konkretisieren.

Neben einer Vollzugshilfe durch eine Bund-Länderarbeitsgemeinschaft und neben der Ergänzung von Windenergieerlassen der Bundesländer käme grundsätzlich für eine Konkretisierung von materiell-rechtlichen Anforderungen an die Entsorgung der Rotorblätter auch eine Technische Anleitung in der Rechtsform einer normkonkretisierenden VV in Betracht.

Als Technische Anleitungen gelten Verwaltungsvorschriften, die die gesetzlichen Anforderungen im Bereich des Umweltrechts konkretisieren. Als Verwaltungsvorschriften wenden sich auch Technische Anleitungen unmittelbar nur an die Verwaltung und haben grundsätzlich ausschließlich für diese Gültigkeit (Maslaton 2019, S. 1082 f.). Als normkonkretisierende Vorschriften, die naturwissenschaftliche Fragen betreffen und im Wege der Beteiligung fachkundiger Kreise entwickelt werden, können sie aber auch als „antizipiertes Sachverständigengutachten“ qualifiziert oder auch unabhängig von einer solchen Qualifizierung in Grenzen gerichtsverbindlich sein. Das gibt ihnen im Vergleich zu Vollzugshilfen der LAGA und zu Windenergieerlassen ein grundsätzlich höheres Maß an Verbindlichkeit auch für Anlagenbetreiber bzw. für Gerichte.

Nicht zuletzt kommen grundsätzlich auch Technische Baubestimmungen der Länder für weitergehende Anforderungen an WEA mit Blick auf die Entsorgung in Betracht. Technische Baubestimmungen der obersten Bauaufsichtsbehörden werden zum Teil auch dazu eingesetzt, bauordnungsrechtliche Anforderungen an WEA zu richten (siehe dazu z. B. den Windenergieerlass Niedersachsen, Nds. MB. 2016, S. 197). So sieht z. B. § 73a LBO BW vor, dass die Anforderungen nach § 3 Abs. 1 Satz 1 LBO BW durch Technische Baubestimmungen konkretisiert werden. Von den in Technischen Baubestimmungen enthaltenen Planungs-, Bemessungs- und Ausführungsregelungen kann nur dann abgewichen werden, wenn mit einer anderen Lösung in gleichem Maße die Anforderungen erfüllt werden und in der Technischen Baubestimmung eine Abweichung nicht ausgeschlossen ist. Nach § 3 Abs. 1 LBO BW sind bauliche Anlagen sowie Grundstücke, andere Anlagen und Einrichtungen im Sinne von § 1 Abs. 1 Satz 2 LBO BW so anzuordnen und zu errichten, dass die öffentliche Sicherheit oder Ordnung, insbesondere Leben, Gesundheit oder die natürlichen Lebensgrundlagen, nicht bedroht werden und dass sie ihrem Zweck entsprechend ohne Missstände benutzbar sind.

Die von der obersten Bauaufsichtsbehörde durch öffentliche Bekanntmachung als Technische Baubestimmungen eingeführten technischen Regeln gelten als allgemein anerkannte Regeln der Technik (so ausdrücklich § 3 Abs. 3 S. 1 BauO NRW). Technische Baubestimmungen werden als Verwaltungsvorschriften erlassen, die die Anforderungen des Bauordnungsrechts zur Gefahrenabwehr interpretieren. Ob es sich bei ihnen auch darüberhinausgehend um normkonkretisierende Verwaltungsvorschriften handeln kann, die gegebenenfalls eine auch die Gerichte bindende Wirkung hätten, ist zweifelhaft und müsste im jeweiligen Einzelfall geprüft werden (offen gelassen von VGH BW, Urt. v. 07.10.2020 – 8 S 2959/18, juris Rn. 33).

Fraglich ist, ob bauordnungsrechtliche Ermächtigungsgrundlagen auch zu Technischen Baubestimmungen ermächtigen, die dazu dienen sollen, eine hochwertige, schadlose und ordnungsgemäße Verwertung von Abfällen zu sichern, die erst bei dem Rückbau oder Abbruch einer baulichen Anlage anfallen. § 3 Abs. 1 S. 5 BauO NRW sieht zwar ausdrücklich vor, dass die Möglichkeiten zur Vermeidung und Verwertung von Bauabfällen und Bodenaushub zu nutzen sind. Ein Zweifel an der Eignung Technischer Baubestimmungen zur Konkretisierung der Entsorgungsanforderungen im vorgenannten Sinne besteht aber darin, dass es sich um Vorschriften handelt, die bei der Planung und Errichtung von Bauvorhaben beachtlich sein können, die jedoch nicht geeignet sind, Anforderungen an die Entsorgung der zu demontierenden Rotorblätter im Nachgang zu richten. Hinzu kommt, dass technische Baubestimmungen auf der Grundlage von Ermächtigungsvorschriften des Bauordnungsrechts von den Ländern erlassen werden müssen und insoweit eine bundesweit einheitliche Regelung mittelbar nur dadurch erreichbar ist, dass sich die Bundesländer an einer entsprechenden Musterregelung orientieren.

Ein noch gewichtigerer Nachteil ergibt sich daraus, dass die Technischen Baubestimmungen der Gefahrenabwehr und nicht der Gefahrenvorsorge dienen und daher nicht dazu eingesetzt werden können, Vorsorgestandards im Bereich der Abfallentsorgung zu setzen. Technische Baubestimmungen dienen der Hauptaufgabe des Bauordnungsrechts, Gefahren für die öffentliche Sicherheit und Ordnung abzuwehren. § 3 Abs. 1 S. 1 LBO BW gibt z. B. als Grundnorm für das Land den gesetzlichen Rahmen für das Bauordnungsrecht vor. Alle aufgrund einer Landesbauordnung erlassenen Rechtsverordnungen, örtlichen Bauvorschriften, Verwaltungsvorschriften und Einzelanordnungen müssen sich grundsätzlich, soweit nichts anderes bestimmt ist, in dem Rahmen halten, der durch die Aufgabengrundsatznorm der

jeweiligen BauO gesetzt wird (VGH BW, Beschl. v. 10.07.2019 – 8 S 2962/18, juris Rn. 23). Der bauordnungsrechtliche Gefahrenbegriff setzt voraus, dass „aus gewissen gegenwärtigen Zuständen nach dem Gesetz der Kausalität gewisse andere Schaden bringende Zustände und Ereignisse erwachsen werden“ (VGH BW, Beschl. v.10.07.2019 – 8 S 2962/18, juris Rn. 24). Schadensmöglichkeiten, die sich nicht ausschließen lassen, weil nach dem derzeitigen Wissensstand bestimmte Ursachenzusammenhänge weder bejaht noch verneint werden können, begründen danach keine Gefahr im bauordnungsrechtlichen Sinne, sondern lediglich einen Gefahrenverdacht oder ein Besorgnispotential. Die bauordnungsrechtliche Generalklausel bietet nach Ansicht des VGH Mannheim keine Handhabe, derartigen Schadensmöglichkeiten im Wege der Vorsorge zu begegnen. Die Befugnisse und Ermächtigungen der Baurechtsbehörden umfassten Vorsorgemaßnahmen nicht ausdrücklich. Die entsprechenden Vorschriften ließen sich aber auch nicht in diesem Sinne erweiternd auslegen, indem der Exekutive, wie es der Antragsgegner offenbar für geboten hält, eine "Einschätzungsprärogative" auch in Bezug darauf zugebilligt werde, ob die vorliegenden Erkenntnisse überhaupt die Annahme einer Gefahr rechtfertigen.

Technische Baubestimmungen, mit denen Anforderungen an die Entsorgung von Rotorblattabfällen konkretisiert werden, wären danach nur zulässig, wenn es sich dabei tatsächlich um Vorschriften zur Gefahrenabwehr im bauordnungsrechtlichen Sinne und nicht um Anforderungen im Sinne einer vorsorglichen, besonders hochwertigen Verwertung von Abfällen handelt. Zur Vermeidung von rechtlichen Zweifeln in diesem Zusammenhang wird deshalb nicht empfohlen, technische Baubestimmungen auf der Grundlage des Bauordnungsrechts der Länder zur Konkretisierung von Anforderungen an die Verwertung von Rotorblattabfällen zu entwickeln.

7.8 Instrumente der Produktverantwortung

Instrumente der Produktverantwortung können dazu beitragen, Abfälle im Zusammenhang mit der Demontage von Rotorblättern zu vermeiden bzw. eine Verwertung von Rotorblattabfällen entsprechend der Abfallhierarchie der §§ 6, 8 KrWG und entsprechend den Anforderungen an die Kreislaufwirtschaft nach § 7 KrWG sicherzustellen. Der SRU hat in seinem Umweltgutachten 2020 die Bundesregierung zu der Prüfung ermuntert, wie eine Produktverantwortung für mengen- und umweltrelevante Produkte, wie z. B. Möbel, Textilien und ausgewählte Bauprodukte, auf nationaler Ebene sinnvoll eingeführt werden kann (Potrykus et al.).

Worauf sich die Produktverantwortung inhaltlich erstreckt, beschreibt der Gesetzgeber beispielhaft und nicht abschließend in § 23 Abs. 2 KrWG. Die §§ 24, 25 KrWG enthalten zudem eine Vielzahl von Ermächtigungsgrundlagen für den Verordnungsgeber zum Erlass von Anforderungen an Verbote, Beschränkungen und Kennzeichnungen sowie an Rücknahme- und Rückgabepflichten.

7.8.1 Einführung

Anforderungen der Produktverantwortung können nicht nur auf der Grundlage der genannten Ermächtigungen der §§ 24, 25 KrWG bestimmt werden. Vielmehr kann auch der Gesetzgeber selbst solche Anforderungen formulieren. Von dieser Möglichkeit hat der Gesetzgeber z. B. mit dem VerpackG, dem BattG und dem ElektroG Gebrauch gemacht. Den Rechtsformwechsel von der VerpackV hin zum VerpackG hat der Gesetzgeber damit begründet, dass die neu eingeführte Beleihung einer Zentralen Stelle mit hoheitlichen Aufgaben Regelungen durch den Gesetzgeber

selbst notwendig gemacht habe (BT-Drs. 18/11274, Seite 51; siehe auch Giesberts 2018, Einleitung Rn. 2 zur Konkretisierung der Produktverantwortung für Elektroaltgeräte in einem Gesetz statt in einer Rechtsverordnung). Ein weiterer Grund, statt einer Verordnung den Weg über ein Gesetz zur Produktverantwortung zu wählen, soll sich für Elektroaltgeräte aus § 44 Abs. 2 ElektroG ergeben, wonach Klagen gegen Anordnungen nach § 15 Abs. 4 Satz 1 ElektroG oder nach § 38 Abs. 3 ElektroG keine aufschiebende Wirkung haben. Eine solche Regelung im Sinne von § 80 Abs. 2 S. 1 Nr. 3 VwGO kann nur der Gesetzgeber selbst beschließen (Giesberts, 2018, Einleitung Rn. 2).

Bei der Ausgestaltung einer Produktverantwortung muss insoweit berücksichtigt werden, ob in diesem Zusammenhang Regelungen in Betracht gezogen werden, die nur der Gesetzgeber treffen kann.

Wer Erzeugnisse entwickelt, herstellt, be- oder verarbeitet oder vertreibt, trägt zur Erfüllung der Ziele der Kreislaufwirtschaft nach § 23 Abs. 1 S. 1 KrWG die Produktverantwortung. Empfehlungen an den Verordnungsgeber, im Wege einer Verordnung Instrumente der Produktverantwortung für die Entsorgung von Rotorblättern einzusetzen, stehen unter dem Vorbehalt, dass die gesetzlichen Voraussetzungen für den Einsatz dieser Instrumente (z. B. Produktanforderungen, Kennzeichnungs- und Informationspflichten, Rücknahme- und Rückgabepflichten) vorliegen, dass der Grundsatz der Verhältnismäßigkeit nach § 23 Abs. 3 i.V.m. § 7 Abs. 4 KrWG gewahrt bleibt und dass die Auswirkungen auf die Wettbewerbs- und Warenverkehrsfreiheit hinreichend berücksichtigt werden.

Nicht zuletzt steht das Gebrauchmachen von den Verordnungsermächtigungen zur Produktverantwortung im Ermessen des Verordnungsgebers. Vor- und Nachteile des Einsatzes solcher Instrumente müssen deshalb bei der Ausübung des Verordnungsermessens gewichtet werden. Darauf müssen dementsprechend auch entsprechende Empfehlungen an den Verordnungsgeber Rücksicht nehmen.

7.8.1.1 Produktverantwortung für WEA oder für Einzelkomponenten

Für die mögliche Ausgestaltung der Produktverantwortung entweder für die WEA insgesamt oder aber auch für Einzelkomponenten, etwa für die Rotorblätter, ist von Bedeutung, wer Hersteller oder Vertreiber im vorgenannten Sinne ist, ob WEA von einem einheitlichen, für sämtliche Komponenten verantwortlichen Hersteller produziert und vertrieben werden, ob die Rotoren einschließlich der Rotorblätter oder sogar die Rotorblätter isoliert von eigenverantwortlichen Lieferanten hergestellt und vertrieben werden und ob eine von den Herstellerbetrieben zu trennende, eigenständige Vertriebsstruktur besteht.

Die Hersteller- und Vertriebsstrukturen sind für die Frage bedeutsam, auf welcher Ebene ggfs. eine Produktverantwortung einsetzen soll, ob bei den Vertreibern von WEA oder von Rotorblättern angesetzt werden soll, ob die Hersteller der WEA oder spezieller der Rotorblätter als Adressaten für eine Produktverantwortung infrage kommen. Hinzu kommt, dass die vom Gesetzgeber im Jahre 2020 im KrWG eingeführte Obhutspflicht sich nur auf Vertreiber und nicht auf Hersteller bezieht (BT-Drs. 19/19373, S. 56).

Der Begriff des Herstellers ist im KrWG nicht legaldefiniert. Legaldefinitionen des Herstellers und Vertreibers sehen zwar das VerpackG, das BattG, das ElektroG und auch die AltfahrzeugV vor. Allerdings handelt es sich dabei nicht um verallgemeinerungsfähige Begriffsdefinitionen,

sondern um spezifische Festlegungen des Kreises der Pflichtadressaten. So ist z. B. nach § 3 Abs. 14 VerpackG Hersteller jeder Vertreiber, der Verpackungen erstmals gewerbsmäßig in Verkehr bringt. Und nach § 2 Nr. 3 AltfahrzeugV bezeichnet „Hersteller“ im Sinne dieser Verordnung den Hersteller von Fahrzeugen laut Fahrzeugbrief oder laut Zulassungsbescheinigung Teil II oder den gewerblichen Importeur eines Fahrzeugs und den Hersteller oder gewerblichen Importeur von Fahrzeugteilen und -werkstoffen sowie deren Rechtsnachfolger. Grundsätzlich und allgemeiner formuliert bedeutet Herstellung eines Produktes in diesem Zusammenhang nicht nur die Herstellung des Endproduktes, sondern auch selbständiger Teile des Endproduktes (Mann, 2019, § 23 Rn. 10; Tünnesen-Harmes 2014, 2014, § 23 KrWG Rn. 25). Jeder, der ein (Einzel-) Teil zum eigenen oder fremden Ge- oder Verbrauch herstellt, fällt in diesem Sinne unter den Begriff der Herstellung. Hersteller sind dementsprechend nicht nur diejenigen, die WEA produzieren, sondern auch diejenigen, die Rotorblätter zuliefern. § 4 Abs. 1 Satz 1 Bundesministerium der Justiz (BMJ); Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) derjenige, der ein Endprodukt, einen Grundstoff oder ein Teilprodukt hergestellt hat. Als Hersteller gilt nach § 4 Abs. 1 Satz 2 ProdHaftG auch derjenige, der sich durch das Anbringen seines Namens, seiner Marke oder eines anderen unterscheidungskräftigen Kennzeichens als Hersteller ausgibt (Quasi-Hersteller). Fraglich könnte sein, ob Quasi-Hersteller in diesem Sinne des Produkthaftungsrechts auch Hersteller im Sinne der Produktverantwortung nach § 22 Abs. 1 Satz 1 KrWG sind. Die Übertragbarkeit dieses Herstellerbegriffs des § 4 ProdHaftG auf die Produktverantwortung des KrWG ist umstritten (siehe dazu Mann, 2019, § 25 KrWG Rn. 10). In aller Regel dürfte diese Frage allerdings akademischer Natur sein, weil Quasi-Hersteller sich regelmäßig nur deshalb als Hersteller ausgeben, weil sie die entsprechenden Produkte bzw. Erzeugnisse vertreiben wollen und insoweit als Vertreiber ohnehin produktverantwortlich sind.

Der Abschlussbericht 117/2019 nimmt an, dass die Hersteller der Rotorblätter üblicherweise nur als Zulieferer agieren und die Rotorblätter nach dem Design und den Vorgaben der Hersteller der WEA produzieren. Das spreche dafür, die Produktverantwortung auch dem Hersteller der WEA zuzuweisen. Die Rotorblätter würden üblicherweise auch durch den Hersteller der WEA in den Verkehr gebracht (Abschlussbericht 117/2019, S. 193 f).

Der Gesetz- und Verordnungsgeber kann über den Herstellerbegriff die Adressaten der Produktverantwortung bestimmen. Er verfügt insoweit über ein gesetzgeberisches Ermessen bzw. über ein weites Verordnungsermessen, bei dessen Ausübung er vor allem den Grundsatz der Verhältnismäßigkeit, die Festlegungen des Gemeinschaftsrechts über den freien Warenverkehr und den Gleichheitssatz beachtet (siehe auch § 23 Abs. 4 S. 1 KrWG). Das gilt auch für eine auf die Entsorgung von Rotorblättern bezogene Produktverantwortung. Sollen grundsätzlich mehrere Personenkreise (z. B. Hersteller und Vertreiber von WEA einerseits und Hersteller und Vertreiber von Rotorblättern andererseits) Produktverantwortung übernehmen, steht es ebenfalls im Ermessen des Gesetz- oder Verordnungsgebers, einzelne Pflichten auch einzelnen Personen bzw. Personengruppen zuzuordnen und ggfs. auch eine Priorisierung für die Inanspruchnahme vorzusehen.

7.8.1.2 Umfang der Produktverantwortung

Erzeugnisse sind gemäß § 23 Abs. 1 S. 2 KrWG möglichst so zu gestalten, dass bei ihrer Herstellung und ihrem Gebrauch das Entstehen von Abfällen vermindert wird und sichergestellt ist, dass die nach ihrem Gebrauch entstandenen Abfälle umweltverträglich verwertet oder beseitigt werden. Beim Vertrieb der Erzeugnisse ist dafür zu sorgen, dass deren

Gebrauchstauglichkeit erhalten bleibt und diese nicht zu Abfall werden. Die Produktverantwortung umfasst nach § 23 Abs. 2 KrWG insbesondere

1. die Entwicklung, die Herstellung und das Inverkehrbringen von Erzeugnissen, die ressourceneffizient, mehrfach verwendbar, technisch langlebig, reparierbar und nach Gebrauch zur ordnungsgemäßen, schadlosen und hochwertigen Verwertung sowie zur umweltverträglichen Beseitigung geeignet sind,
2. den vorrangigen Einsatz von verwertbaren Abfällen oder sekundären Rohstoffen, insbesondere Rezyklaten, bei der Herstellung von Erzeugnissen,
3. den sparsamen Einsatz von kritischen Rohstoffen und die Kennzeichnung der in den Erzeugnissen enthaltenen kritischen Rohstoffe, um zu verhindern, dass diese Erzeugnisse zu Abfall werden sowie sicherzustellen, dass die kritischen Rohstoffe aus den Erzeugnissen oder den nach Gebrauch der Erzeugnisse entstandenen Abfällen zurückgewonnen werden können,
4. die Stärkung der Wiederverwendung von Erzeugnissen, insbesondere die Unterstützung von Systemen zur Wiederverwendung und Reparatur,
5. die Senkung des Gehalts an gefährlichen Stoffen sowie die Kennzeichnung von schadstoffhaltigen Erzeugnissen, um sicherzustellen, dass die nach Gebrauch der Erzeugnisse entstandenen Abfälle umweltverträglich verwertet oder beseitigt werden,
6. den Hinweis auf Rückgabe-, Wiederverwendungs-, Verwertungs- und Beseitigungsmöglichkeiten oder -pflichten und Pfandregelungen durch Kennzeichnung der Erzeugnisse,
7. die Rücknahme der Erzeugnisse und der nach Gebrauch der Erzeugnisse entstandenen Abfälle sowie deren nachfolgende umweltverträgliche Verwertung oder Beseitigung,
8. die Übernahme der finanziellen oder der finanziellen und organisatorischen Verantwortung für die Bewirtschaftung der nach Gebrauch der Erzeugnisse entstandenen Abfälle,
9. die Information und Beratung der Öffentlichkeit über Möglichkeiten der Vermeidung, Verwertung und Beseitigung von Abfällen, insbesondere über Anforderungen an die Getrenntsammlung sowie Maßnahmen zur Verhinderung der Vermüllung der Umwelt,
10. die Beteiligung an Kosten, die den öffentlich-rechtlichen Entsorgungsträgern und sonstigen juristischen Personen des öffentlichen Rechts für die Reinigung der Umwelt und die anschließende umweltverträgliche Verwertung und Beseitigung der nach Gebrauch der aus den von einem Hersteller oder Vertreiber in Verkehr gebrachten Erzeugnissen entstandene n Abfälle entstehen sowie
11. eine Obhutspflicht hinsichtlich der vertriebenen Erzeugnisse, insbesondere die Pflicht, beim Vertrieb der Erzeugnisse, auch im Zusammenhang mit deren Rücknahme oder Rückgabe, dafür zu sorgen, dass die Gebrauchstauglichkeit der Erzeugnisse erhalten bleibt und diese nicht zu Abfall werden.

7.8.1.3 Schnittstellen zur Betreiberverantwortung

Zieht man in Betracht, Hersteller und Vertreiber von WEA bzw. von Rotorblättern im Rahmen der Produktverantwortung für die Entsorgung der Rotorblattabfälle verantwortlich zu machen, dann stellt sich die Frage, wo die Schnittstellen zur Verantwortung der Betreiber von WEA gebildet werden sollen. Die Betreiber dieser Anlagen sind – wie erläutert – nach den geltenden Bestimmungen und dem im Umweltrecht allgemein geltenden Verursacherprinzip nicht nur für den Rückbau und die Demontage der WEA, sondern auch für die Entsorgung der Abfälle, die bei bzw. nach der Stilllegung ihrer Anlage anfallen, und damit auch für die Entsorgung von Rotorblattabfällen verantwortlich. Sie müssen dazu ganz überwiegend Verpflichtungserklärungen abgeben und auskömmliche Sicherheiten stellen.

Bei der Zuweisung einer Produktverantwortung von Herstellern und Vertreibern für die Entsorgung von Rotorblättern muss entschieden werden, ob die Produktverantwortung zusätzlich oder neben die Betreiberverantwortung treten soll oder ob und inwieweit Betreiber von WEA insoweit aus ihrer Entsorgungsverantwortung entlassen werden sollen. Eine Entlassung aus der Betreiberverantwortung dürfte von vornherein nur für die Entsorgung einzelner Teile der WEA, für Rotorblätter, ggfs. auch für werthaltige Maschinenhäuser, Nd-Magneten, für Speicher und Transformatoren in Betracht zu ziehen sein, d. h. für Anlagenteile, deren hochwertige Verwertung ohne eine ergänzende Produktverantwortung nicht in hinreichendem Umfang gesichert erscheinen könnte. Die Entsorgungsverantwortung des Betreibers für die WEA insgesamt, d. h. insbesondere für Türme und Fundamente sollte davon in jedem Fall unberührt bleiben. Das bedeutet zugleich, dass die Betreiber der WEA für deren Demontage der Anlagen nach ihrer Stilllegung verantwortlich bleiben. Denkbar wäre die Einführung eines Rückgaberechts oder einer Rückgabepflicht der Anlagenbetreiber für bestimmte Anlagenkomponenten, insbesondere für die Rotorblätter, an deren Hersteller und Vertreiber, kombiniert mit einer Rücknahmepflicht für Hersteller und Vertreiber.

Außerdem stellt sich die Frage, ob sich eine Produktverantwortung auf die finanzielle oder organisatorische Verantwortung beschränken oder sich auf eine Kombination finanzieller und organisatorischer Verantwortung erstrecken soll. Denkbar ist im Grundsatz beides: Die Hersteller können z. B. zur Rücknahme, die Anlagenbetreiber jedoch auch zur kostenpflichtigen Rückgabe verpflichtet werden.

Ob spezifische Kenntnisse der Hersteller und Vertreiber zur Konstruktion und zu den verbauten Materialien die Einführung einer Produktverantwortung rechtfertigen oder erfordern, muss möglicherweise für die einzelnen Teile einer WEA differenziert beantwortet werden. Die Kenntnis von verwendeten Materialien und von der Konstruktion ist bei den Rotorblättern durchaus für das Recycling von erheblicher Bedeutung. Ob dies in gleicher Weise aber auch für andere Teile der Anlage gilt, ist zweifelhaft. Ob Kenntnisse von Herstellern und Vertreibern über die Konstruktion und die für die Herstellung der Rotorblätter verwendeten Stoffe und/oder Fasern überhaupt eine Produktverantwortung z. B. im Sinne einer Rücknahmepflicht rechtfertigen könnten, hängt unter anderem auch davon ab, ob und inwieweit die für die Entsorgung der Rotorblätter notwendigen Informationen auch anderweitig verfügbar sind, so z. B. über die gegenüber den Aufsichtsbehörden bestehenden Informationspflichten, aus den im Genehmigungsverfahren vorzulegenden Antragsunterlagen oder über Informationspflichten von Lieferanten nach § 16 f Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMUV) 16.09.1980.

Zutreffend ist darauf hingewiesen worden, dass für einzelne Komponenten bereits aktuell eine Produktverantwortung besteht. Das betrifft elektronische Komponenten der WEA, die in den Anwendungsbereich des ElektroG fallen (§ 2 Abs. 2 Nr. 6, § 2 Abs. 2 Nr. 2 Bundesministerium der Justiz (BMJ); siehe dazu UBA-Abschlussbericht 117/2019, S. 193).

Möchte man einer Rücknahmepflicht oder einer Rückgabepflicht im Hinblick auf die Rotorblätter näher treten, müsste bei einer bleibenden Verantwortung des Betreibers für die Demontage der Anlage und für ihren Transport zu einem zu definierenden Rücknahmeort vorgegeben werden, in welcher Art und Weise die Demontage stattfindet, in welchem Zustand also das demontierte Rotorblatt zurückgenommen werden muss und welche Konsequenzen sich

aus einer diesen Vorgaben nicht entsprechenden Rückgabe ergeben (Annahmeverweigerung/Mehrkostenerstattung, etc.).

7.8.1.4 Stoffstrom- oder produktbezogene Produktverantwortung

Zutreffend ist in dem Abschlussbericht 117/2019 auch darauf hingewiesen worden, dass sich die erörterten Probleme des Recyclings von WEA und insbesondere auch von Rotorblättern auf Verbundwerkstoffe beziehen, die auch in anderen Produkten verwendet werden, was nahelegen könnte, dass eine auf die Hersteller von Rotorblättern bezogene Produktverantwortung durch eine Einführung einer speziellen Rücknahme- und Rückgabepflicht nicht sinnvoll ist (Abschlussbericht 117/2019, S. 194). Dafür könnten auch Empfehlungen der LAGA zu faserhaltigen Abfällen sprechen, wonach zwar für die Abfallfraktionen Getrenntsammlungs- und Kennzeichnungspflichten gelten sollten, die eine spezifische Entsorgung dieser faserhaltigen Abfälle sicherstellen. Ob dafür allerdings eine Rücknahme des gesamten Rotorblatts oder auch nur der carbon- und glasfaserhaltigen Fraktionen der Rotorblattabfälle an die Hersteller und Vertreiber empfehlenswert ist, ist fraglich.

7.8.1.5 Grenzen der Produktverantwortung

Im Rahmen der Produktverantwortung sind gem. § 23 Abs. 3 KrWG neben der Verhältnismäßigkeit der Anforderungen entsprechend § 7 Abs. 4 KrWG die sich aus anderen Rechtsvorschriften ergebenden Regelungen zur Produktverantwortung und zum Schutz von Mensch und Umwelt sowie die Festlegungen des Unionsrechts über den freien Warenverkehr zu berücksichtigen. Die Bundesregierung bestimmt nach § 23 Abs. 4 S. 1 KrWG durch Rechtsverordnungen auf Grund der §§ 24, 25 KrWG, welche Verpflichteten die Produktverantwortung wahrzunehmen haben. Sie legt nach § 23 Abs. 4 S. 2 KrWG zugleich fest, für welche Erzeugnisse und in welcher Art und Weise die Produktverantwortung wahrzunehmen ist.

Der Erlass von Verordnungen zur Produktverantwortung steht, vorbehaltlich unionsrechtlicher Vorgaben, im weiten Verordnungsermessen der Bundesregierung. Im Rahmen dieses Ermessens dürfte eine maßgebliche Rolle spielen, ob die Einführung einer Produktverantwortung den politisch gewünschten Ausbau der Windenergie in Deutschland eher behindert als fördert. Die Einführung einer Produktverantwortung wäre bejahendenfalls nur sinnvoll, wenn ansonsten zu befürchten stünde, dass die Rotorblätter nicht hinreichend hochwertig, schadlos und ordnungsgemäß verwertet werden.

7.8.1.6 Besondere Produkteigenschaften der Rotorblätter

Für die Frage, ob und inwieweit sich gegebenenfalls die Instrumente der Produktverantwortung eignen, um Rotorblattabfälle zu vermeiden oder zumindest hochwertig, ordnungsgemäß und schadlos zu verwerten bzw. allgemeinwohlverträglichen zu beseitigen, gilt es nicht zuletzt einige besondere Produkteigenschaften im Vergleich zu anderen Abfällen im Auge zu behalten, für die gesonderte Rücknahmepflichten/Rückgabepflichten durch den Gesetzgeber oder den Verordnungsgeber eingeführt worden sind. Bei den Rotorblättern handelt es sich im Vergleich zu Verpackungen, Batterien, Elektrogeräten und selbst im Vergleich zu Autos mit einer Betriebszeit von 20 bis 25 Jahren um langlebige Produkte. Es besteht insoweit die Gefahr, dass Hersteller und Vertreiber zum Zeitpunkt der abfallrechtlichen Entledigung des Rotorblatts nicht mehr existieren. Damit zusammenhängende Probleme können möglicherweise in

Rücknahmesystemen oder aber auch durch Sicherheitsleistungen gelöst werden. Das alles führt allerdings zu einem erhöhten bürokratischen Aufwand.

Hinzu kommt, dass Rotorblätter für WEA nur auf der Grundlage einer immissionsschutzrechtlichen Genehmigung, einer Baugenehmigung oder – bei kleineren Anlagen – einer Bauanzeige errichtet und betrieben werden dürfen. Vor allem die größeren Anlagen, bei denen die unter Entsorgungsgesichtspunkten eher problematischen Werkstoffe wie Glasfasern und Carbonfasern eingesetzt werden, werden immissionsschutzrechtlich genehmigt und auch immissionsschutzrechtlich überwacht. Diese Überwachung erstreckt sich auch auf die Entsorgung der Rotorblätter. Das unterscheidet die Situation grundlegend von Massengütern wie z. B. Verpackungen, Elektroaltgeräten, Batterien, etc. Auch das Erfordernis einer vom Anlagenbetreiber zu erbringenden Sicherheitsleistung für den Rückbau und damit auch für die Entsorgung der Rotorblätter verdeutlicht einen gewichtigen Unterschied zu anderen rücknahmepflichtigen (Massen-)Erzeugnissen.

7.8.2 Beschränkungen und Verbote des Inverkehrbringens von Rotorblättern

Die Bundesregierung kann gem. § 24 Nrn. 1-4 KrWG nach Anhörung der beteiligten Kreise durch Rechtsverordnung mit Zustimmung des Bundesrates bestimmen, dass

1. bestimmte Erzeugnisse nur ressourceneffizient, insbesondere in einer Form, die die mehrfache Verwendung, die technische Langlebigkeit und die Reparierbarkeit erleichtert sowie in bestimmter, die Abfallbewirtschaftung spürbar entlastender Weise in Verkehr gebracht werden dürfen,
2. bestimmte Erzeugnisse nur in bestimmter Beschaffenheit oder Form oder für bestimmte Verwendungen in Verkehr gebracht werden dürfen, bei denen eine umweltverträgliche Verwertung oder Beseitigung der nach Gebrauch der Erzeugnisse entstandenen Abfälle gewährleistet werden kann,
3. bestimmte Erzeugnisse nur in bestimmter, die Abfallentsorgung spürbar entlastender Weise in Verkehr gebracht werden dürfen, insbesondere in einer Form, die die mehrfache Verwendung oder die Verwertung erleichtert,
4. bestimmte Erzeugnisse nicht in Verkehr gebracht werden dürfen, wenn a) bei der Verwertung oder Beseitigung der nach Gebrauch der Erzeugnisse entstehenden Abfälle die Freisetzung von Schadstoffen nicht oder nur mit unverhältnismäßig hohem Aufwand verhindert werden könnte und die umweltverträgliche Verwertung oder Beseitigung nicht auf andere Weise sichergestellt werden kann, b) ihre Verwendung in erheblichem Umfang zur Vermüllung der Umwelt beiträgt und dies nicht oder nur mit unverhältnismäßig hohem Aufwand verhindert werden kann.

Das Forschungsvorhaben befasst sich mit der Entwicklung von Rückbau- und Recyclingstandards für Rotorblätter und damit jedenfalls nicht unmittelbar mit Produktanforderungen für die zukünftige Herstellung von Rotorblättern. Lediglich mittelbar könnten sich aus den Erkenntnissen im Zusammenhang mit der Entwicklung der genannten Standards auch Konsequenzen für die zukünftige Produktion von Rotorblätter ergeben.

Beschränkungen oder sogar Verbote des Inverkehrbringens von in bestimmter Weise hergestellten WEA bzw. von bestimmten Rotorblättern könnten der hohen Priorität widersprechen, die dem Ausbau der Windenergie im Rahmen der Energiewende und der Klimaschutzpolitik eingeräumt wird. Die Bundesregierung sieht aktuell eine Steigerung des Anteils erneuerbarer Energien am Bruttostromverbrauch von etwa 38 % im Jahr 2018 auf 65 %

bis zum Jahr 2030 vorrangig durch den Ausbau der Windenergienutzung vor (Klimaschutzprogramm 2030 der Bundesregierung zur Umsetzung des Klimaschutzplans 2050, S. 37; dazu Wahlhäuser 2021, S. 3; Marquard 2020, S. 598¸ Bovet et al. 2020, S. 754; Beckers et al. 2017, S. 643). Die Windenergie macht rund die Hälfte des durch erneuerbare Energien produzierten Bruttostroms aus. Die Bundesnetzagentur geht von einem erforderlichen Zubau von Wind-Onshore von zwei bis drei GW pro Jahr aus, Wirtschaftsverbände weitergehend sogar von einem jährlichen Zubau von mehr als 4 GW (Bovet et al. 2020, S. 754). Außerdem besteht das Risiko, dass verbindliche Vorgaben für das Produktdesign die technische Weiterentwicklung der Recyclingtechnologie eher behindern als befördern.

7.8.2.1 Produktdesign

Nach § 24 Nr. 1 KrWG kann der Verordnungsgeber bestimmen, dass bestimmte Erzeugnisse nur ressourceneffizient, insbesondere in einer Form, die die mehrfache Verwendung, die technische Langlebigkeit und die Reparierbarkeit erleichtert sowie in bestimmter, die Abfallbewirtschaftung spürbar entlastender Weise in Verkehr gebracht werden dürfen. Produkte sollen in diesem Sinne kreislaufwirtschaftsfähig gestaltet werden, wobei kreislaufwirtschaftsfähige Gestaltung von Produkten bedeutet, dass sie grundsätzlich langlebig, schadstofffrei, materialeffizient, reparierbar und recyclingfähig sind (Hornberg et al.). So könnte man z. B. den Einsatz von Unwuchtgewichten aus Blei unterbinden.

Fraglich ist, ob es Anlass für eine Empfehlung gibt, durch Verordnung zu bestimmen, dass Rotorblätter zur Erleichterung ihrer Mehrfachverwendung, ihrer technischen Langlebigkeit und Reparierbarkeit sowie zur Entlastung der Abfallbewirtschaftung nur mit einer spezifischen Konstruktion bzw. mit spezifischen Materialeigenschaften in den Verkehr gebracht werden dürfen. Hilfreich wären in diesem Sinne allerdings nur konkrete technische Vorgaben. Allgemein gehaltene Anforderungen, wie z. B. in § 4 Abs. 1 S. 1 ElektroG, werden als nicht besonders praxistauglich kritisiert (SRU, 2020, S. 138; Prelle 2010, S. 516). Nach § 4 Abs. 1 S. 1 ElektroG haben Hersteller ihre Elektro- und Elektronikgeräte möglichst so zu gestalten, dass insbesondere die Wiederverwendung, die Demontage und die Verwertung von Altgeräten, ihren Bauteilen und Werkstoffen berücksichtigt und erleichtert werden. Dabei ist allerdings zu berücksichtigen, dass Rotorblätter von WEA technisch weniger komplex und kleinteilig als zahlreiche Elektrogeräte konstruiert sind, sodass die konkrete Formulierung technischer Anforderungen zur Sicherung einer ordnungsgemäßen und schadlosen Entsorgung bzw. zur Verbesserung von Wiederverwendungsmöglichkeiten leichter fallen dürfte.

Rechtliche Vorgaben für eine wiederverwendungs- und recyclingfreundliche Konstruktion von Rotorblättern würden Konstrukteuren bzw. Herstellern bei einer Betriebsdauer der Rotorblätter von 20–25 Jahren eine Prognose oder Abschätzung abverlangen, welche Wiederverwendungs- und Verwertungstechnologien für welche Teile und Materialien zum Zeitpunkt nach Stilllegung und Demontage der WEA technisch und wirtschaftlich möglich sind, bzw. welche Materialien besonders relevant sind. Diese Zeitspanne ist schwer zu überschauen. Außerdem dürfte es angesichts dieser Zeiträume schwerfallen, Produktanforderungen hinreichend bestimmt, in einer der behördlichen Überwachung zugänglichen Art und Weise zu formulieren. Es bestehen deshalb Zweifel an der Vollzugsfähigkeit solcher Regelungen. Ordnungsrechtliche Instrumente des Umweltrechts kommen in diesem Zusammenhang an ihre Grenzen (Prelle, 2010, S. 516).

Der SRU weist aber auch auf positive Beispiele für konkrete Produktanforderungen z. B. für die Beschränkung bestimmter Schwermetalle, Weichmacher und Flammschutzmittel hin. Diese seien für Elektro- und Elektronikgeräte in § 3 Abs. 1 ElektroStoffV geregelt. Analoge Regelungen zu Stoffbeschränkungen gäbe es auch für Fahrzeuge, Batterien und Verpackungen. Weitere Stoffregulierungen bestünden insbesondere durch die POP- und die REACH-Verordnung.

Für den Fall, dass bestimmte Vorgaben für die Herstellung von Rotorblättern die vorgenannten Ziele einer mehrfachen Verwendung, einer Verbesserung der technischen Langlebigkeit und Reparierbarkeit, etc. befördern könnten, müsste im Sinne der gebotenen Verhältnismäßigkeitsprüfung weiter festgestellt werden, ob und gegebenenfalls welche negativen Konsequenzen sich daraus ergeben könnten, sei es für die Größe der Anlage bzw. für ihre Energieeffizienz oder sei es für steigende Produktionskosten. Abzuwägen wäre außerdem, ob die genannten Ziele untereinander in Konflikt stehen können, weil z. B. technische Langlebigkeit mit negativen Konsequenzen für die Abfallentsorgung verbunden sein kann.

7.8.2.2 Gewährleistung umweltverträglicher Entsorgung

Nach § 24 Nr. 2 KrWG kann der Verordnungsgeber bestimmen, dass bestimmte Erzeugnisse nur in bestimmter Beschaffenheit oder Form oder für bestimmte Verwendungen in Verkehr gebracht werden dürfen, bei denen eine umweltverträgliche Verwertung oder Beseitigung der nach Gebrauch der Erzeugnisse entstandenen Abfälle gewährleistet werden kann. Fraglich könnte z. B. sein, ob es sinnvoll ist, eine Technologie der segmentierten Rotorblätter vorzuschreiben, um Umweltbeeinträchtigungen im Zusammenhang mit dem Demontieren, Zersägen und Zerkleinern von Rotorblättern vor Ort zu vermeiden, oder bestimmte Techniken der Verbindung von Rotorblatt und Nabe vorzuschreiben, um eine Demontage zu erleichtern, oder im Sinne besserer Recyclingmöglichkeiten die Verwendung bestimmter Harze (Polyurethan-Harze) vorzuschreiben oder eine Regelung zur Verwendung von Balsaholz oder Kunststoffschäumen vorzugeben.

Es stellt sich die Frage, ob sich aus den Ergebnissen der Kapitel 2 bis 6 Anlass für eine Empfehlung zur zukünftigen Produktgestaltung von Rotorblättern mit Blick auf das Erfordernis einer umweltverträglichen Entsorgung ausgedienter Rotorblätter ergibt. Bejahendenfalls müssten allerdings auch die negativen Konsequenzen für die Rotorblattproduktion, seien es Abstriche an der Langlebigkeit, an der Windstabilität, an der Größe, hinsichtlich der Produktionskosten, etc. benannt werden.

Eine solche Empfehlungen für das Produktdesign könnte sich z. B. beziehen auf

- eine Beschränkung der Verwendung bestimmter Pech-basierter Carbonfasern,
- die Verwendung besonders gut recycelbarer Harze,
- die Vermeidung produktionsbedingter Strukturschäden.

7.8.3 Kennzeichnungs- und Hinweispflichten

§ 24 Nr. 5 KrWG ermächtigt die Bundesregierung zum Erlass einer Rechtsverordnung, wonach bestimmte Erzeugnisse in bestimmter Weise zu kennzeichnen sind, um insbesondere die Erfüllung der Pflichten nach § 7 Abs. 2 und 3, § 8 Abs. 1 oder § 9 Abs. 1 und 3 KrWG im Anschluss an die Rücknahme zu sichern oder zu fördern. § 24 Nr. 6 KrWG ermächtigt die Bundesregierung zum Erlass einer Rechtsverordnung, wonach bestimmte Erzeugnisse wegen der im Erzeugnis

enthaltenen kritischen Rohstoffe, sonstiger Materialien oder des Schadstoffgehalts der nach Gebrauch der Erzeugnisse entstehenden Abfälle nur mit einer Kennzeichnung in Verkehr gebracht werden dürfen, die insbesondere auf die Notwendigkeit einer Rückgabe an die Hersteller, Vertreiber oder bestimmte Dritte hinweist. Außerdem darf die Bundesregierung nach § 24 Nr. 7 KrWG in einer Rechtsverordnung bestimmen, dass für bestimmte Erzeugnisse an der Abgabestelle oder der Stelle des Inverkehrbringens Hinweise zu geben oder die Erzeugnisse zu kennzeichnen sind im Hinblick auf a) die Vermeidung der nach Gebrauch der Erzeugnisse entstandenen Abfälle und die Wiederverwendbarkeit der Erzeugnisse, b) die Vermeidung der Vermüllung der Umwelt durch die nach Gebrauch der Erzeugnisse entstandenen Abfälle, c) den Einsatz von sekundären Rohstoffen, insbesondere Rezyklaten sowie die Recyclingfähigkeit der nach Gebrauch der Erzeugnisse entstandenen Abfälle, d) die umweltverträgliche Verwertung und Beseitigung der nach Gebrauch der Erzeugnisse entstandenen Abfälle und e) die Rückgabemöglichkeit im Falle einer verordneten Rücknahme- oder Rückgabepflicht nach § 25 KrWG.

Die LAGA empfiehlt eine Kennzeichnung von Carbonfaser-Materialien, um eine separate Entsorgung der anfallenden Abfälle zu ermöglichen, außerdem die Prüfung der Möglichkeiten einer chemischen, maschinenlesbaren Markierung von Carbonfaser-Materialien sowie deren ökologische und ökonomische Sinnhaftigkeit und die Aufnahme einer Markierungspflicht für carbonfaserhaltige Produkte in die einschlägigen europäischen Regelungen (LAGA-Abschlussbericht, 2019, S. 31).

Auch im UBA-Abschlussbericht 117/2019 (S. 195) wird eine Kennzeichnungspflicht zu den verwendeten Materialien der Rotorblätter empfohlen. Eine solche Kennzeichnung bzw. Information der Hersteller insbesondere von CFK-Elementen würden die Verwertung der Rotorblätter erleichtern. Die Umsetzung solcher Vorgaben erfordere Informationsstandards, Verantwortliche für die Archivierung und Erhebung der Informationen (Behörde, Betreiber, Hersteller, Rückbau-Unternehmen) sowie Archivierungsstandards unter Berücksichtigung des Wettbewerbsrechts.

Der SRU erläutert in seinem Umweltgutachten 2020 (S. 170), die Neuregelung der erweiterten Herstellerverantwortung in Art. 8 a AbfRRL erlaube es, erweiterte Informationspflichten als Grundvoraussetzung für den Marktzugang einzuführen. Um entsprechende Informationen zu Produkten transparent und nutzbar bereitzustellen, empfiehlt der SRU, sogenannte Kreislaufpässe produktgruppenspezifisch verbindlich vorzuschreiben. Diese Kreislaufpässe sollten sowohl Informationen zu Inhaltsstoffen (Wert- und Schadstoffe) als auch Informationen zu Reparatur- und Recyclingverfahren dauerhaft und leicht zugänglich bereitstellen.

Es dürfte bei näherem Hinsehen zwischen Kennzeichnungs- und Hinweis- oder Informationspflichten zu unterscheiden sein.

7.8.3.1 Erforderlichkeit einer Kennzeichnung

Wesentliches Merkmal einer Kennzeichnung im Sinne der vorgenannten Verordnungsermächtigungen ist es, dass diese unmittelbar am Produkt angebracht ist und umweltrelevante Informationen über dieses enthält (Tünnesen-Harmes, 2014, § 24 Rn. 43). Die Kennzeichnung kann sich auf die Verwendung bestimmter Zeichen oder Symbole, aber auch auf einen bestimmten Kennzeichnungstext beziehen. Die Kennzeichnungen dienen der Information des Verwenders. Ihre Funktion für die Erfüllung der Grundpflicht nach §§ 7–9 KrWG nach

Rücknahme können sie dann erfüllen, wenn sie über die materielle Beschaffenheit des Produktes insoweit informieren, als diese Beschaffenheit für den Entsorgungsweg von Bedeutung sein kann. Das gilt etwa für bestimmte Materialkennzeichnungen bei Kunststoffen oder für Demontagehinweise bei Elektronikgeräten.

Zu klären ist, ob eine solche Kennzeichnung durch die Hersteller oder Vertreiber zu den bei der Produktion der Rotorblätter verwendeten Materialien und Stoffen und zur Blattkonstruktion (z. B. durch Kennzeichnung CFK-freier und CFK-haltiger Bereiche des Rotorblatts) für die spätere Entsorgung der Rotorblätter im Sinne des zu beachtenden Verhältnismäßigkeitsgrundsatzes geeignet, erforderlich und angemessen ist und welche konkreten Inhalte eine solche Kennzeichnung enthalten soll.

Kennzeichnungen auf den jeweiligen Produkten selbst sind insbesondere bei Produkten sinnvoll, bei denen der Verbraucher nicht über gesonderte Produktunterlagen, Produktdaten oder sogar Sicherheitsdatenblätter verfügt oder bei denen angenommen werden muss, dass solche Unterlagen, wie etwa Gebrauchsanweisungen, zum späteren Zeitpunkt der Entsorgung nicht mehr vorhanden sind.

Bei den Rotorblättern handelt es sich in diesem Sinne jedoch nicht um Produkte, die von einer nicht individualisierbaren Zahl von Verbrauchern konsumiert werden, sondern um Teile von WEA, die in aller Regel entweder auf der Grundlage von dezidierten Antragsunterlagen immissionsschutzrechtlich genehmigt oder aber zumindest baurechtlich auf der Grundlage von Bauantragsunterlagen genehmigt oder den Behörden angezeigt worden sind. Das könnte eher gegen die Notwendigkeit einer Kennzeichnungs-, nicht jedoch gegen eine Informationspflicht sprechen.

Allerdings können Kennzeichnungspflichten auch für Produkte sinnvoll sein, für die spezifische Kenntnisse über die Konstruktion und Materialzusammensetzung für eine spätere Entsorgung benötigt werden und bei denen nicht sichergestellt ist, dass diese spezifischen Kenntnisse noch vorhanden sind, wenn die Produkte am Ende ihrer Nutzungszeit zu Abfall werden. Das dürfte insbesondere für langlebige Produkte gelten, weil bei einer langen Lebensdauer die Gefahr zunimmt, dass der über die notwendigen Informationen verfügende Hersteller am Markt nicht mehr tätig ist. Außerdem könnte für eine Kennzeichnungspflicht die Vielzahl unterschiedlicher Produkte für denselben Verwendungszweck sprechen, wenn sich diese hinsichtlich ihrer Konstruktion und der für ihre Produktion verwendeten Stoffe in entsorgungserheblicher Weise unterscheiden. Rotorblätter sind in diesem Sinne langlebig; außerdem gibt es eine Vielzahl solcher Rotorblätter, die sich hinsichtlich ihrer Konstruktion und Materialzusammensetzung in entsorgungsrelevanter Weise unterscheiden.

Unstreitig dürfte sein, dass zukünftig sichergestellt sein muss, dass Entsorgungsunternehmen, die Rotorblätter im Auftrage der Anlagenbetreiber oder bei einer entsprechenden Rücknahmepflicht der Hersteller oder Vertreiber entsorgen sollen, über alle Informationen verfügen, die für eine ordnungsgemäße, schadlose und hochwertige Verwertung erforderlich sind. Dazu sind Kenntnisse erforderlich darüber, welche Schadstoffe an welcher Stelle in den ehemaligen Produkten enthalten sind. Kennzeichnungen auf den Rotorblättern können dazu hilfreich sein; ob sie ausreichend sind oder darüber hinaus auch weitere Informationen verfügbar gehalten werden müssen, hängt von dem konkreten Inhalt dieser Informationen ab.

Im Vordergrund dürften deshalb Informationspflichten der Hersteller und Vertreiber an die Betreiber von WEA und in der Folge von den Anlagenbetreibern an die Überwachungsbehörden und die von ihnen – vorbehaltlich einer Entsorgungsverantwortung der Hersteller und Vertreiber auf der Grundlage einer Rücknahmepflicht – zu beauftragenden Entsorgungsunternehmen stehen. Ob daneben ein Teil dieser Informationen auch über eine Kennzeichnung auf den Rotorblättern selbst vorgesehen ist, dürfte insoweit nachrangig sein. Daraus allein dürften sich keine besonderen, zusätzlichen Beeinträchtigungen mit Blick auf mögliche Betriebsgeheimnisse der Hersteller ergeben.

Im UBA-Abschlussbericht 117/2019 (S. 65) wird in diesem Zusammenhang berichtet, dass die für die Verwertung relevante Lokalisierung der CFK-freien Bereiche zumeist nur per „trial and error“ möglich sei. Spezifische Informationen seien in der erforderlichen Detailtiefe häufig nicht verfügbar. Die CFK-freien Bereiche eines Rotorblatts würden zumeist nur anhand der Farbe des entstehenden Sägestaubs identifiziert, der bei CFK deutlich dunkler als bei GFK sei. Zudem lasse sich CFK auch anhand von längeren Sägezeiten und teilweise auch visuell identifizieren. Außerdem sei relevant, dass einzelne WEA-Komponenten für spezifische WEA-Modelle häufig von verschiedenen Zulieferfirmen hergestellt würden und in ihren Spezifikationen deutlich voneinander abweichen könnten. Folglich könnten allein aufgrund der Bezeichnung der WEA-Modelle häufig noch keine fundierten Aussagen zu dem jeweiligen Rotorblatt und dessen Aufbau gemacht werden. Zudem seien zum Teil deutliche Abweichungen von den technischen Spezifikationen für einzelne Rotorblätter möglich (UBA-Abschlussbericht 117/2019, S. 66). Möglicherweise ist die Informationslage individuell jedoch unterschiedlich, soweit es Entsorgungsunternehmen gibt, die von einer hinreichenden, freiwilligen Information durch die Hersteller berichten.

Geht man davon aus, dass für eine ordnungsgemäße, schadlose und hochwertige Verwertung der Rotorblätter Informationen fehlen, dann liegt es auf der Hand, dass solche Informationen zur Verfügung gestellt werden müssen, entweder über Kennzeichnungspflichten, über Informationspflichten oder über eine Kombination von Kennzeichnungs- und Informationspflichten.

§ 28 ElektroG sieht in eine Informationspflicht der Hersteller gegenüber Wiederverwendungseinrichtungen und Behandlungsanlagen vor, die dafür beispielhaft sein könnte. Danach hat jeder Hersteller den Wiederverwendungseinrichtungen und den Behandlungsanlagen Informationen über die Wiederverwendung, die Vorbereitung zur Wiederverwendung und die Behandlung für jeden in Verkehr gebrachten Typ neuer Elektro- und Elektronikgeräte kostenlos zur Verfügung zu stellen. Die Informationen sind innerhalb eines Jahres nach dem Inverkehrbringen des jeweiligen Gerätes in Form von Handbüchern oder elektronisch zur Verfügung zu stellen. Aus den Informationen muss sich ergeben, welche verschiedenen Bauteile und Werkstoffe die Elektro- und Elektronikgeräte enthalten und an welcher Stelle sich in den Elektro- und Elektronikgeräten gefährliche Stoffe und Gemische befinden. Die Pflicht besteht aber nur, soweit dies für die Wiederverwendungseinrichtungen und die Behandlungsanlagen erforderlich ist, um den Bestimmungen dieses Gesetzes nachkommen zu können.

Eine durch den Verordnungsgeber zu regelnde Informationspflicht könnte sich bei den Rotorblättern beziehen auf Informationen wie z. B.

- Länge,
- Gewicht,
- Umfang,
- Art der Befestigung am Rotor,
- Lage des Schwerpunkts,
- Anschlagpunkte, Umfang und Ort der Verwendung von Glas- und Carbonfasern, etc..

Allerdings hängt die Erforderlichkeit einer entsprechenden Regelung im Rahmen einer Produktverantwortung auch davon ab, ob und inwieweit die notwendigen Informationen auf andere Weise bereits zur Verfügung stehen oder jedenfalls leichter verfügbar gemacht werden könnten. Ohne plausiblen Anlass sollten zusätzliche, im konkreten Fall noch abzuschätzende Bürokratiekosten durch Informations- und Kennzeichnungspflichten für die Unternehmen der Windenergiebranche und für die Verwaltung nicht eingeführt werden.

7.8.3.2 Genehmigungsrechtliche Informationsmöglichkeiten

Für die immissionsschutzrechtlich genehmigungsbedürftigen WEA sieht § 4c Nr. 6 der 9. BImSchV vor, dass die Antragsunterlagen unter anderem auch die vorgesehenen Maßnahmen zur Behandlung der bei einer Betriebseinstellung vorhandenen Abfälle beschreiben müssen. Nach § 5 Abs. 3 Nr. 2 BImSchG sind bei der Errichtung, beim Betrieb und bei der Stilllegung von Anlagen Vorkehrungen dafür zu treffen, dass vorhandene Abfälle nach der Einstellung des Betriebs ordnungsgemäß und schadlos verwertet oder ohne Beeinträchtigung des Wohls der Allgemeinheit beseitigt werden. Diese Pflicht ist nicht erst nach Einstellung des Betriebs der WEA zu erfüllen; vielmehr besteht die entsprechende Pflichtenstellung schon zum Zeitpunkt der Errichtung der WEA. Die spätere Erfüllung der Pflichten nach § 5 Abs. 3 BImSchG ist damit bereits Genehmigungsvoraussetzung nach § 6 Abs. 1 S. 1 BImSchG vor der Errichtung und Inbetriebnahme der WEA. Deshalb schreibt der Verordnungsgeber in § 4c Nr. 6 der 9. BImSchV vor, dass der Vorhabenträger bereits bei Antragstellung die zur Entsorgungsvorsorge vorgesehenen Maßnahmen darlegt (Dietlein 2019, 2019, § 4c der 9. BImSchV Rn. 14).

Die immissionsschutzrechtliche Genehmigungs- und Überwachungsbehörde kann Angaben darüber verlangen, in welcher Weise die Rotorblätter nach Beendigung des Betriebs der WEA entsorgt werden sollen, welche Stoffe und Materialien mit Blick auf ihre spätere Entsorgungsrelevanz verwendet worden sind und wie damit später umgegangen werden soll. In einer Vollzugshilfe kann erläutert werden, welche Angaben die Genehmigungsbehörde benötigt, um die Genehmigungsvoraussetzungen des § 5 Abs. 3 BImSchG prüfen zu können.

Angesichts einer Betriebszeit von 20 bis 25 Jahren dürfte es allerdings häufig zum Zeitpunkt der Stilllegung der WEA weiteren Informationsbedarf geben können, weil nämlich der Stand der Technik der Entsorgung der Rotorblätter fortgeschritten sein kann oder weil neue Erkenntnisse zu bestimmten Stoffen, Stäuben und Fasern zwischenzeitlich gewonnenen worden sein können. Darauf kann die Überwachungsbehörde reagieren, wenn ihr die Stilllegung einer WEA entweder immissionsschutzrechtlich nach § 15 Abs. 3 BImSchG oder baurechtlich nach dem jeweiligen Bauordnungsrecht der Länder angezeigt wird. Allerdings können sich die Überwachungsbehörden insoweit nur an den Betreiber der WEA wenden, der aber möglicherweise selbst gar nicht über die maßgeblichen Informationen verfügt. Es wäre deshalb

vorzugswürdig, wenn der Anlagenbetreiber, der für den Rückbau der WEA ein Entsorgungskonzept vorbereiten soll, über die notwendigen Informationen auch sicher verfügen würde bzw. einen Anspruch gegen den Hersteller bzw. den Vertreiber der Anlage auf eine entsprechende Information hätte und berechtigt würde, diese Informationen an das von ihm beauftragte Entsorgungsunternehmen auch weiterzugeben.

In aller Regel dürfte der Betreiber einer WEA von seinem Lieferanten sämtliche Informationen zivilrechtlich verlangen dürfen, die notwendig sind, damit die Errichtung und der Betrieb der in Auftrag gegebenen WEA auch immissionsschutzrechtlich genehmigt werden kann. In dem Maße, in dem die Genehmigungsbehörde auch vollständige Antragsunterlagen mit Blick auf eine spätere Entsorgung der Rotorblätter fordert, dürfte der Hersteller bzw. Vertreiber der Anlage veranlasst sein, diese Informationen auch dem Anlagenbetreiber zur Verfügung zu stellen. Das dürfte im Normalverlauf Gegenstand des zwischen dem Hersteller/Vertreiber und dem Anlagenbetreiber geschlossenen Kaufvertrags oder Werkvertrags sein. Ohne eine konkrete gesetzliche Pflicht zur Informationsweitergabe können sich allerdings im jeweiligen Einzelfall vor allem mit Blick auf konkrete Rezepturen, die aus Sicht des Herstellers geheimhaltungsbedürftig sind, Probleme ergeben. Deshalb wäre eine verbindliche Regelung dazu hilfreich, wobei zum Schutz von Geschäfts- und Betriebsgeheimnissen sichergestellt werden sollte, dass tatsächlich nur die entsorgungsrelevanten Informationen verlangt werden können. Soweit etwa eine Kenntnis der genannten Rezepturen für die Entsorgung der Rotorblattabfälle nicht erforderlich ist, bedarf es auch keiner Informationsverpflichtung; eine solche wäre möglicherweise nicht erforderlich und damit unverhältnismäßig.

Nichts anderes sollte gelten, wenn die Aufsichtsbehörde zu einem späteren Zeitpunkt, etwa um eine Nachsorgeanordnung nach der Anzeige der Stilllegung der WEA vorzubereiten, oder aber um die geforderte Sicherheitsleistung zu einem späteren Zeitpunkt neu zu kalkulieren, um entsprechende Informationen nachsucht. Insoweit besteht allerdings das Risiko, dass der Hersteller bzw. Vertreiber zwischenzeitlich insolvent geworden oder nicht mehr am Markt vorhanden ist oder aber selbst nicht mehr über die erforderlichen Informationen verfügt.

7.8.3.3 Informationen aus dem Marktstammdatenregister

Ergänzend zu neuen Informations- und Kennzeichnungspflichten kommt eine Schließung von Datenlücken im MaStR in Betracht. Die Bundesnetzagentur errichtet und betreibt nach § 111 e EnWG das Marktstammdatenregister als elektronisches Verzeichnis mit energiewirtschaftlichen Daten. Zur näheren Ausgestaltung des Marktstammdatenregisters hat das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie die Verordnung über das zentrale elektronische Verzeichnis energiewirtschaftlicher Daten (Marktstammdatenregisterverordnung – MaStRV, vom 10. April 2017, BGBl. I S. 842) erlassen.

Der Sinn und Zweck dieses Registers richtet sich in erster Linie auf energiepolitische Zielsetzungen und nicht auf Fragen einer ordnungsgemäßen und schadlosen Verwertung von Rotorblättern der WEA. Nach § 111e Abs. 1 S. 2 EnWG dient das Marktstammdatenregister dazu, die Verfügbarkeit und Qualität der energiewirtschaftlichen Daten zur Unterstützung des Zwecks und der Ziele nach § 1 EnWG für die im Energieversorgungssystem handelnden Personen sowie für die zuständigen Behörden zur Wahrnehmung ihrer gesetzlichen Aufgaben zu verbessern, den Aufwand zur Erfüllung energierechtlicher Meldepflichten zu verringern und die Transformation des Energieversorgungssystems gegenüber der Öffentlichkeit transparent darzustellen. Gem. § 111 e Abs. 2 Nr. 1 a) EnWG umfasst das Marktstammdatenregister

bestimmte Daten über die Unternehmen und Anlagen der Elektrizitäts- und Gaswirtschaft, in der Elektrizitätswirtschaft insbesondere Daten über Anlagen zur Erzeugung und Speicherung von elektrischer Energie sowie deren Betreiber. In das MaStR können als Stammdaten Standortdaten, Kontaktinformationen, technische Anlagedaten, Unternehmensform, technische Zuordnung etc. eingetragen werden.

Nach § 1 Abs. 1 EnWG ist Zweck des Gesetzes eine möglichst sichere, preisgünstige, verbraucherfreundliche, effiziente und umweltverträgliche leitungsgebundene Versorgung der Allgemeinheit mit Elektrizität und Gas, die zunehmend auf erneuerbaren Energien beruht. Die Sicherstellung einer ordnungsgemäßen, schadlosen und hochwertigen Verwertung der Abfälle, die nach Stilllegung einer WEA anfallen, dürfte dem Gesetzeszweck einer umweltverträglichen Energieversorgung dienen. Die Ergänzung der Pflichtangaben zum Marktstammdatenregister um Angaben zur Konstruktion und Materialzusammensetzung von Rotorblättern wäre vom Gesetzeszweck des EnWG und von der Verordnungsermächtigung des § 111e EnWG gedeckt.

Das MaStR ist im Rahmen dieses Forschungsvorhabens ausgewertet worden (siehe dazu Kapitel 2.3.1). Dabei hat sich herausgestellt, dass das MaStR geeignete Informationen liefert, um den Anlagenbestand von WEA in Deutschland zu analysieren und über Angaben zu Herstellern und Typenbezeichnungen die verwendeten Rotorblatttypen abzuleiten. Allerdings beschreibt das Register den tatsächlichen Bestand an WEA in Deutschland nur unvollständig. Es ließ sich bei der Recherche im MaStR außerdem erkennen, dass einige Angaben zwar immer oder fast immer vorhanden sind, wie die Nennleistung der WEA, das Datum der Inbetriebnahme sowie der Standort. Besonders groß waren jedoch die Datenlücken bei Angaben zu den Herstellern, zu dem WEA-Typ, zum Rotordurchmesser, zur Nabenhöhe und zu Standortkoordinaten. Angaben zur (Naben)-Höhe, zum Rotordurchmesser, zum Hersteller und die Typenbezeichnung zählen bereits zu den Pflichtangaben für Windenergieanlagen in Tabelle II (Zu erfassenden Daten zu Stromerzeugungseinheiten, EEG-Anlagen und KWK-Anlagen). Für den Fall, dass die Angaben zum Register unvollständig oder unzutreffend sind, hat die Bundesnetzagentur nach § 10 Abs. 1 S. 1 MaStRV jederzeit die Möglichkeit, die gespeicherten Daten zu überprüfen. Die Bundesnetzagentur kann außerdem gem. § 10 Abs. 2 S. 1 MaStRV registrierte Marktakteure verpflichten, die von ihnen eingetragenen Daten zu prüfen und, soweit notwendig, berichtigte Daten einzutragen. Die Verantwortlichkeit für die Richtigkeit der Daten verbleibt nach § 10 Abs. 2 S. 5 MaStRV bei den Marktakteuren (siehe dazu OLG Brandenburg, Urt. v. 05.01.2021 – 6 U 129/19, juris). Die Bundesnetzagentur kann bei Verletzung der Mitwirkungspflichten nach dieser Verordnung die erforderlichen Anordnungen treffen, um die Richtigkeit der Daten im Marktstammdatenregister herzustellen.

Empfohlen wird eine ergänzende Verpflichtung zur Angabe von Herstellern und Typenbezeichnungen, des Rotordurchmessers, Rotorblattgewichts und zu den Hauptmaterialien der Rotorblätter.

Solche Angaben würden die Möglichkeiten einer Abschätzung verbessern, ob und inwieweit eine ordnungsgemäße, schadlose und hochwertige Verwertung der Abfälle, die nach der zu erwartenden Stilllegung von WEA mittel- und langfristig anfallen, gesichert ist. Dazu müsste der Verordnungsgeber die Anlage über die im Marktstammregister zu erfassenden Daten ergänzen.

Für die Entsorgung der Rotorblätter wären weitere Informationen hilfreich, wie z. B. zur genauen Materialzusammensetzung und zur Konstruktion der Rotorblätter. Es ist allerdings

zweifelhaft, ob die Pflichtangaben des MaStR so umfassend ergänzt werden können, dass sie im Einzelfall den Informationsbedürfnissen der Rückbau- und Recyclingunternehmen genügen, weil die Ermächtigungsgrundlage für den Verordnungsgeber sich auf ein elektronisches Verzeichnis mit energiewirtschaftlichen Daten und nicht in erster Linie auf die Sicherstellung einer ordnungsgemäßen, schadlosen und hochwertigen Entsorgung von Abfällen nach Stilllegung einzelner Energieerzeugungsanlagen gerichtet ist. Solche Einzelinformationen, etwa technische Zeichnungen zur Konstruktionsweise sowie Rückbau-/Demontageanleitungen, müssen den Entsorgungsverantwortlichen bzw. den von ihnen beauftragten Entsorgungsunternehmen auf anderen Wegen, entweder im Zuge des Genehmigungsverfahrens oder über Informationspflichten im Rahmen der der Produktverantwortung, zur Verfügung gestellt werden.

7.8.3.4 Chemikalienrechtliche Informationspflichten

Eine weitere Informationsquelle könnte eine auf chemikalienrechtlicher Grundlage eingerichtete bzw. noch einzurichtende Datenbank sein. Dazu ist, nicht zuletzt veranlasst durch Art. 9 Abs. 1 Buchst. i AbfRRL, eine Informationspflicht der Lieferanten über die in ihren Erzeugnissen enthaltenen besonders besorgniserregenden Stoffe (Substances of very high concern [SVHC]) vorgeschrieben worden. Lieferanten sind nach § 16 Abs. 1 S. 1 ChemG ab dem 5.1.2021 verpflichtet, Informationen an eine Datenbank zu liefern, die von Abfallentsorgern und Verbrauchern genutzt werden kann, um diejenigen Erzeugnisse oder deren Bestandteile aus dem zu behandelnden Abfallstrom zu identifizieren und abzutrennen, die im weiteren Recycling zur Schadstoffanreicherung führen könnten (siehe dazu auch Art. 9 Abs. 2 AbfRRL und Petersen und Friedrich 2021, S. 5). Die verbesserte Information soll es ermöglichen, größere Mengen qualitativ hochwertiger Rezyklate mit breiteren Anwendungsmöglichkeiten zu gewinnen. Der Verordnungsgeber ist durch § 16 f. Abs. 2 ChemG ermächtigt worden, näher zu bestimmen, auf welche Art und Weise und mit welchen Maßgaben die Verpflichtung nach Absatz 1 unter Berücksichtigung der auf Unionsebene entwickelten Vorgaben für die Datenbank zu erfüllen ist.

7.8.3.5 Kennzeichnungspflichten im Bauproduktenrecht

Das Bauordnungsrecht der Länder (siehe z. B. § 17 NBauO) bestimmt, dass die Herstellung, Überwachung und Kennzeichnung von Bauprodukten bestimmten Regelungen unterliegen. Danach sind insbesondere die in den vom Deutschen Institut für Bautechnik herausgegebenen Bauregellisten A oder B veröffentlichten, als Technische Baubestimmungen geltenden, technischen Regeln heranzuziehen und auch die im ABl. der EU auf Grundlage der Bauproduktenverordnung (Verordnung (EU) Nr. 305/2011 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 09.03. 2011 zur Festlegung harmonisierter Bedingungen für die Vermarktung von Bauprodukten und zur Aufhebung der Richtlinie 89/106/EWG des Rates; ABl. EU Nr. L 88, S. 5) bekannt gemachten Produktennormen zugrunde zu legen (siehe dazu die Muster-Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen -MVV TB- Stand: August 2019). Mit Hilfe dieser Produktnormen sind geregelte Bauprodukte verwendbar. Aber auch ungeregelte Bauprodukte können mit einer erteilten Allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung oder einer Europäisch Technischen Bewertung verwendet werden. Für innovative Bauprodukte oder Bauarten, für die keine bekannt gemachten Technischen Baubestimmungen oder Zulassungen existieren oder falls von solchen wesentlich abgewichen werden soll, ist eine Zustimmung im Einzelfall bei der obersten Bauaufsichtsbehörde zu beantragen.

Nr. 5.2.3.3 des Windenergieerlasses NRW verweist für WEA auf die unter Nummer 2.7.9 und zugehörigen Anlagen (2.4/7 und 2.7/12) im Runderlass „Änderung des Runderlasses Einführung Technischer Baubestimmungen nach § 3 Abs. 3 BauO NRW“ vom 4. Februar 2015 (MBl. NRW S. 166) bekannt gemachten technischen Regeln, die nach Nr. 1 der Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen (VV TB) vom 13. Juni 2017 (MBl. NRW S. 660) als Technische Baubestimmungen im Sinne des § 87 BauO NRW 2016 gelten. Die „Richtlinie für WEA; Einwirkungen und Standsicherheitsnachweise für Turm und Gründung; Fassung Oktober 2012“ ist in NRW als Technische Baubestimmung eingeführt. Technische Baubestimmungen für WEA können sich in diesem Sinne nicht nur auf Fragen der Standsicherheit beziehen, sondern auch auf Anforderungen an die Entsorgung von Rotorblattabfällen erstrecken, insbesondere auch an Kennzeichnungen von Rotorblättern richten.

Ein Vorzug von Kennzeichnungs- und Hinweispflichten in einer Verordnung nach § 24 KrWG bestünde gegenüber Kennzeichnungspflichten in Technischen Baubestimmungen in ihrer bundesweit einheitlichen Geltung. Die Bundesregierung hat darauf z. B. im Zusammenhang mit dem Erlass eines Batteriegesetzes ausdrücklich hingewiesen (Gesetzesbegründung, BT-Drs. 16/12227, S. 17). Eine divergierende Landesgesetzgebung bezüglich des Schadstoffgehalts von Batterien und Akkumulatoren, die alle für den gesamtdeutschen Markt produziert bzw. importiert würden, würde – so die Bundesregierung – erhebliche Nachteile für die Gesamtwirtschaft mit sich bringen und damit die Funktionsfähigkeit des Wirtschaftsraumes gefährden. Zugleich würde die Gesetzesvielfalt auf Länderebene zu einer Rechtszersplitterung führen, die bei Anforderungen an Verbrauchsgüter, die im gesamten Bundesgebiet gleichermaßen in Verkehr gebracht würden, im Interesse sowohl des Bundes als auch der Länder nicht hingenommen werden könne. Zwar handelt es sich bei den Rotorblättern nicht um Verbrauchsgüter vergleichbar den Batterien. Dennoch wären unterschiedliche Produktanforderungen, Kennzeichnungen etc. in den einzelnen Bundesländern für die Funktionsfähigkeit der Windenergiebranche abträglich.

7.8.3.6 Betriebs- und Geschäftsgeheimnisse

Eine Verpflichtung zur Kennzeichnung von Rotorblättern zum Zwecke ihrer möglichst hochwertigen, ordnungsgemäßen und schadlosen Verwertung müsste auf Betriebs- und Geschäftsgeheimnisse Rücksicht nehmen. Betriebs- und Geschäftsgeheimnisse sind grundrechtlich geschützt (BVerwG, Beschl. v. 25.07.2013 – 7 B 45.12, juris Rn. 9 ff.; Reidt und Schindler 2019, 2019, § 9 UIG, Rn. 20; Rehbinder 2020, 2020, § 2 UmweltHG Rn. 29).

Im Gesetzgebungsverfahren zur Novelle des KrWG im Jahre 2020 hatte der Bundesrat der Bundesregierung empfohlen, in § 23 Abs. 2 KrWG eine Bestimmung als Nr. 5 a einzufügen, wonach in einer Rechtsverordnung die Bereitstellung von öffentlich zugänglichen Informationen über die Zusammensetzung der Erzeugnisse und deren Recyclingfähigkeit einschließlich Informationen zur Demontage hätte gefordert werden können. Zur Begründung führte der Bundesrat aus, Art. 8 Abs. 1 AbfRRl eröffne die Möglichkeit, im Rahmen der erweiterten Herstellerverantwortung Produktverantwortliche zur Bereitstellung von öffentlich zugänglichen Informationen betreffend die Wiederverwendbarkeit und Recyclingfähigkeit zu verpflichten. Hierunter fielen zweckmäßigerweise Informationen über die Materialzusammensetzung der Erzeugnisse, z. B. mit Blick auf kritische Rohstoffe, schadstoffhaltige Stoffe aber auch Stoffe, die ein Recycling des Produktes bzw. von Produktkomponenten erschweren bzw. unwirtschaftlich

machen könnten sowie Angaben zur Demontage. Diese Informationen, z. B. über den Einsatz und die Lage von carbonfaserverstärkten Kunststoffen bei Rotorblättern von Windenergieanlagen, könnten für die Entsorgungsbeteiligten eine hohe Bedeutung bei dem Bestreben erlangen, Stoffkreisläufe durch gezieltes Recycling zu schließen (Bt-Drs. 19/19373, S. 93 f.).

Die Bundesregierung lehnte den Vorschlag ab. Die vorgeschlagenen Angaben könnten für die Entsorgungsbeteiligten zwar eine hohe Bedeutung bei dem Bestreben erlangen, Stoffkreisläufe durch gezieltes Recycling zu schließen. Der Vorschlag eröffne jedoch die Möglichkeit, zur Offenlegung von Rezepturen und damit zur Offenlegung von Betriebsgeheimnissen zu verpflichten. Dies könne zu Belastungen der Wirtschaft führen (BT-Drs. 19/19373, S. 111).

Aus dieser Stellungnahme der Bundesregierung zu einem Gesetzgebungsvorschlag des Bundesrats im Gesetzgebungsverfahren zur Novellierung des KrWG ergibt sich nicht, dass Informationspflichten zur Ermöglichung einer ordnungsgemäßen und schadlosen Entsorgung bestimmter Abfälle an Betriebs- und Geschäftsgeheimnissen der Hersteller scheitern müssten. Die rechtlichen Rahmenbedingungen dazu sollen kurz erläutert werden.

7.8.3.6.1 Begriffe

Betriebs- und Geschäftsgeheimnisse sind nach der Rechtsprechung alle auf ein Unternehmen bezogenen Tatsachen, Umstände und Vorgänge, die nicht offenkundig, sondern nur einem begrenzten Personenkreis zugänglich sind und an deren Nichtverbreitung der Rechtsträger ein berechtigtes Interesse hat. Betriebsgeheimnisse umfassen im Wesentlichen technisches Wissen im weitesten Sinne; Geschäftsgeheimnisse betreffen vornehmlich kaufmännisches Wissen. Die Definition des Geschäftsgeheimnisses in § 2 Nr. 1 GeschGehG gilt unmittelbar nur im zivilrechtlichen Bereich. Das Gesetz dient dem Schutz von Geschäftsgeheimnissen vor unerlaubter Erlangung, Nutzung und Offenlegung (§ 1 Abs. 1 Bundesregierung (BReg); Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMUV)). Öffentlich-rechtliche Vorschriften zur Geheimhaltung, Erlangung, Nutzung oder Offenlegung von Geschäftsgeheimnissen gehen nach § 1 Abs. 2 dieses neuen Gesetzes aus dem Jahr 2019 vor. Denkbar ist deshalb allenfalls eine mittelbare Berücksichtigung dieser Definition auch im öffentlichen Recht (Rehbinder, 2020, § 9 UmweltHG Rn. 16; BVerwG, Urt. v. 30.01.2020 – 10 C 18/19, NVwZ 2020, 1368; Wiebe 2019, S. 1706, Goldammer, 2017, S. 1810).

Informations- und Hinweispflichten für eine Wiederverwendung und für das Recycling von Rotorblättern können aber ohnehin eher Betriebsgeheimnisse der Hersteller betreffen. Ob durch die Bekanntgabe einer Information ein Betriebsgeheimnis zugänglich gemacht wird, kann nur aufgrund plausibler und nachvollziehbarer Darlegungen des Betroffenen beurteilt werden (vgl. VG Schleswig, Urt. v. 02.10.2020 – 6 A 243/18, juris Rn. 49; BVerwG, Urt. v. 24.09.2009 – 7 C 2.09, juris Rn. 58; BVerwG, Beschl. v. 25.07.2013 – 7 B 45.12, juris, Rn. 16).

7.8.3.6.2 Geheime Tatsachen

Ob und inwieweit sich der Anlagenbetreiber bzw. der von ihm beauftragte Hersteller der WEA bzw. der Rotorblätter auf ein Betriebsgeheimnis mit Blick auf Konstruktion und verwendete Stoffe/Materialien des Rotorblätter berufen kann, hängt davon ab, inwieweit es sich dabei überhaupt um geheime Tatsachen handelt, die nur dem Anlagenbetreiber bzw. dem von ihm beauftragten Hersteller bekannt sind. Des Weiteren muss es ein schutzwürdiges Interesse an der Geheimhaltung geben. Informationen, die sich bereits aus anderen Quellen erschließen lassen, sind kein Betriebsgeheimnis mehr.

7.8.3.6.3 Schutzwürdiges Geheimhaltungsinteresse

Außerdem muss ein schutzwürdiges Interesse an der Geheimhaltung bestehen. Ein solches Interesse ist anzunehmen, wenn die Offenlegung der Informationen geeignet ist, exklusives technisches oder kaufmännisches Wissen den Marktkonkurrenten zugänglich zu machen und so die Wettbewerbsposition des Unternehmens nachteilig zu beeinflussen (BVerwG, Beschl. v. 25.07.2013 – 7 B 45.12, juris Rn. 10 ff.; Urt. v. 24.09.2009 – 7 C 2.09, juris Rn. 50 ff.; OVG Berlin-Brandenburg, Urt. v. 29.03.2019 – 12 B 13.18, juris Rn. 55; Urt. v. 18.01.2018 – 12 B 14.16, juris Rn. 26; Urt. v. 12.02.2015 – 12 B 13.12, juris Rn. 32; VGH Baden-Württemberg, Urt. v. 21.03.2017 – 10 S 413/15, juris Rn. 42; OVG Rheinland-Pfalz, Urt. v. 06.09.2012 – 8 A 10096/12, juris Rn. 43; Reidt/Schiller, 2019, § 9 UIG Rn. 21b ff.). Ob das der Fall ist, muss durch eine Abwägung mit dem Informationsbedürfnis der Allgemeinheit bzw. im Falle der Genehmigung einer WEA auch der Nachbarschaft ermittelt werden (Jarass, 2020, § 10 BImSchG Rn. 37 f).

7.8.3.6.4 Überwiegendes öffentliches Interesse an der Information

Ein Betriebs- oder Geschäftsgeheimnis muss im Übrigen der Informationspflicht nicht entgegenstehen, wenn das öffentliche Interesse an der Information überwiegt. Überwiegen bedeutet in diesem Zusammenhang, dass das öffentliche Interesse an der Information größer ist als das Geheimhaltungsinteresse des Herstellers.

7.8.3.6.5 Antragsunterlagen im Genehmigungsverfahren

Soweit z. B. Antragsunterlagen zu WEA Geschäfts- oder Betriebsgeheimnisse enthalten, sind diese Unterlagen im Rahmen von immissionsschutzrechtlichen Genehmigungsverfahren nach § 10 Abs. 2 S. 1 BImSchG zu kennzeichnen und getrennt vorzulegen. Ihr Inhalt muss, soweit es ohne Preisgabe des Geheimnisses geschehen kann, nach § 10 Abs. 2 S. 2 BImSchG so ausführlich dargestellt sein, dass es Dritten möglich ist, zu beurteilen, ob und in welchem Umfang sie von den Auswirkungen der Anlage betroffen werden können. Genehmigungsrelevante Informationen, die Betriebsgeheimnisse enthalten, dürfen insoweit der Genehmigungsbehörde nicht vorenthalten werden. Sie können deshalb auch von dem Hersteller dem Anlagenbetreiber nicht vorenthalten werden, wenn dieser die Informationen der Genehmigungsbehörde im Genehmigungsverfahren vorlegen muss.

Dass die Konstruktion oder die verwendeten Stoffe in einem Rotorblatt vom Hersteller berechtigt oder unberechtigt als Betriebsgeheimnis eingeordnet werden, bedeutet demnach nicht, dass die entsprechenden Angaben der Genehmigungsbehörde verweigert werden dürfen. Sie müssen vielmehr als solche gekennzeichnet und getrennt von anderen, nicht geheimhaltungsbedürftigen Antragsunterlagen eingereicht werden. Dementsprechend ist der Antragsteller und Vorhabenträger verpflichtet, solche Angaben gegenüber der Genehmigungsbehörde zu machen. Beruft sich der Hersteller der Rotorblätter ihm gegenüber auf ein Betriebs- oder Geschäftsgeheimnis und verweigert Angaben, die für die spätere Entsorgung der Rotorblätter von Bedeutung sein könnten, dann könnte dies zur Folge haben, dass die Errichtung und der Betrieb der WEA nicht genehmigungsfähig sind.

Die Pflichten, vorhandene Abfälle ordnungsgemäß und schadlos zu verwerten oder ohne Beeinträchtigung des Wohls der Allgemeinheit zu beseitigen, die für genehmigungsbedürftige Anlagen nach einer Betriebseinstellung bestehen, können nicht nur bereits Gegenstand der immissionsschutzrechtlichen Genehmigung bzw. der dazu vorzulegenden Antragsunterlagen sein. Vielmehr können die zuständigen Genehmigungsbehörden, soweit dies zur Erfüllung dieser Nachsorgepflichten des Anlagenbetreibers erforderlich ist, auch nachträgliche Anordnungen

nach § 17 Abs. 1 S. 1 BImSchG erlassen. Nach § 17 Abs. 4a S. 2 BImSchG kann die Behörde diese auch noch nach der Einstellung der gesamten Betriebsanordnungen zur Erfüllung der sich aus § 5 Abs. 3 BImSchG ergebenden Pflichten während eines Zeitraums von einem Jahr treffen. Soweit es der zuständigen Behörde an Erlass einer solchen Anordnung notwendigen Informationen fehlt, kann sie den Betreiber verpflichten, die benötigten Auskünfte zu erteilen und dazu entsprechende Unterlagen vorzulegen, die zur Erfüllung der Überwachungsaufgabe der Behörde erforderlich sind (§ 52 Abs. 2 S. 1 BImSchG).

Die Ermächtigung zur Erteilung von Auflagen im Genehmigungsbescheid ergibt sich für immissionsschutzrechtlich genehmigungsbedürftige Anlagen aus § 12 BImSchG und für nur baurechtlich genehmigungsbedürftige Anlagen nach den Auflagenvorschriften der anzuwendenden Landesbauordnungen sowie aus § 36 Abs. 2 Nr. 4 VwVfG (Rectanus, 2009, 874).

Unzureichend könnte eine Beschaffung von Informationen für eine ordnungsgemäße Entsorgung der bei der Demontage der Rotorblätter anfallenden Abfälle auf dem Wege über den Anlagenbetreiber sein, wenn dieser selbst nicht hinreichend von dem Hersteller bzw. Lieferanten informiert worden ist, wenn insbesondere auch bei der Erteilung der Genehmigung von der Behörde keine hinreichenden Informationen verlangt worden sind, sei es, weil sie die spätere Entsorgung der Rotorblätter noch nicht in den Blick genommen hat, oder weil zum Zeitpunkt der Erteilung der Genehmigung sich mit der Entsorgung der Rotorblätter stellende Probleme aufgrund der bei den Blättern verwendeten Stoffe noch nicht bekannt gewesen sind.

7.8.3.6.6 Produktbezogene Informations- und Hinweispflichten in anderen Bereichen

Auch in anderen gesetzlichen und verordnungsrechtlichen Regelungen zur Produktverantwortung sind Hinweis- und Informationspflichten vorgesehen. So sieht § 9 Abs. 1 AltfahrzeugV vor, dass die Hersteller von Fahrzeugen verpflichtet sind, in Absprache mit der Werkstoff- und Zulieferindustrie Kennzeichnungsnormen für Bauteile und Werkstoffe zu verwenden, um insbesondere die Identifizierung derjenigen Bauteile und Werkstoffe zu erleichtern, die wiederverwendet oder verwertet werden können. Nach § 9 Abs. 2 S. 1 AltfahrzeugV sind die Hersteller von Fahrzeugen oder ihre Bevollmächtigten verpflichtet, für jeden in Verkehr gebrachten neuen Fahrzeugtyp binnen sechs Monaten nach Inverkehrbringen den anerkannten Demontagebetrieben Demontageinformationen bereitzustellen. In diesen Informationen sind nach § 9 Abs. 2 S. 2 AltfahrzeugV insbesondere im Hinblick auf die Erreichung der Ziele gemäß § 5 AltfahrzeugV die einzelnen Fahrzeugbauteile und -werkstoffe sowie die Stellen aufzuführen, an denen sich gefährliche Stoffe im Fahrzeug befinden, soweit dies für die Demontagebetriebe zur Einhaltung der Anforderungen nach dieser Verordnung erforderlich ist. Unbeschadet der Wahrung der Geschäfts- und Betriebsgeheimnisse sind die Hersteller von Fahrzeugbauteilen nach § 9 Abs. 3 AltfahrzeugV verpflichtet, den anerkannten Demontagebetrieben auf Anforderung angemessene Informationen zur Demontage, Lagerung und Prüfung von wiederverwendbaren Teilen zur Verfügung zu stellen.

Grundsätzlich ist somit die Einführung einer Kennzeichnungs- oder Hinweispflicht auf Informationen, die für die spätere Entsorgung der Rotorblätter relevant sind, zulässig, wenn und soweit solche Informationen nicht bereits aus anderen Quellen bekannt oder auf einfachere Weise anderweitig zu beschaffen sind.

Vor Einführung einer solchen Kennzeichnungs- oder Hinweispflicht sollten die Möglichkeiten einer Informationsverbesserung über die vorzulegenden Antragsunterlagen im

Genehmigungsverfahren, über die Informationsrechte der Aufsichtsbehörde, über bereits vorhandene Datenbanken und Register geprüft werden.

7.8.4 Obhutspflicht

Nach § 23 Abs. 2 Nr. 11 KrWG umfasst die Produktverantwortung eine Obhutspflicht hinsichtlich der vertriebenen Erzeugnisse, insbesondere die Pflicht, beim Vertrieb der Erzeugnisse, auch im Zusammenhang mit deren Rücknahme oder Rückgabe, dafür zu sorgen, dass die Gebrauchstauglichkeit der Erzeugnisse erhalten bleibt und diese nicht zu Abfall werden. Der Verordnungsgeber kann nach § 24 Nr. 10 KrWG bestimmen, dass beim Vertrieb bestimmter Erzeugnisse, auch im Zusammenhang mit deren Rücknahme oder Rückgabe, dafür zu sorgen ist, dass die Gebrauchstauglichkeit der Erzeugnisse erhalten bleibt und diese nicht zu Abfall werden. Grundsätzlich wäre insoweit, vorausgesetzt es wäre technisch sinnvoll und es ließen sich gebrauchte Rotorblätter tatsächlich vermarkten, zulässig, eine Verpflichtung zu regeln, die Gebrauchstauglichkeit der Rotorblätter nach Stilllegung der WEA zu prüfen, sie gegebenenfalls zu erhalten und dafür zu sorgen, dass sie weiterverwendet und damit nicht zu Abfall werden.

Der Gesetzgeber sieht vor, dass eine solche Obhutspflicht auch im Zusammenhang mit einer Rücknahme oder Rückgabe der Erzeugnisse vorgesehen eingeführt werden kann. Dementsprechend könnten die Vertreiber von WEA bzw. von Rotorblättern grundsätzlich auch verpflichtet werden, die Rotorblätter nach ihrer Demontage zurückzunehmen, ihre Funktionstauglichkeit zu prüfen und sie, soweit möglich, als solche zu vermarkten.

Bezweifeln könnte man, ob auch Hersteller von Rotorblättern Adressat einer Obhutspflicht werden können. Die Obhutspflicht bezieht sich nämlich nur auf die Vertreiber von Erzeugnissen, nicht aber auf die Hersteller (Gesetzesbegründung, BT-Drs. 19/19373, S. 58). Soweit die Auffassung vertreten wird, dass die Obhutspflicht sich als eine gezielt an Hersteller und Vertreiber von Erzeugnissen gerichtete Abfallvermeidung darstellt (Petersen und Friedrich 2021, S. 5), ist dies auf den ersten Blick missverständlich, weil Hersteller nur dann Adressat einer Obhutspflicht sein können, wenn sie die von ihnen hergestellten Erzeugnisse auch selbst vertreiben, wenn sie also Vertreiber sind.

Die Gesetzesbegründung erläutert dazu aber, dass der Vertrieb in Anlehnung an § 3 Abs. 12 und 13 VerpackG zu verstehen sei als das gewerbsmäßige Inverkehrbringen von Erzeugnissen, unabhängig davon, auf welcher Handelsstufe und mit welcher Vertriebsmethode dies erfolge. Auch das erstmalige Bereitstellen eines Erzeugnisses im Geltungsbereich des KrWG stelle sich als Inverkehrbringen und damit als Vertreiben dar. Dementsprechend sind auch Hersteller, die ihre Erzeugnisse an Vertreiber abgeben, Vertreiber im Sinne der Obhutspflicht. Auch Hersteller von Rotorblättern können insoweit Adressat einer Obhutspflicht sein.

Funktional zählen zur Vertriebsphase auch der zum Zwecke des Inverkehrbringens durchgeführte Transport und die Lagerhaltung der Erzeugnisse. Nicht erfasst wird nach der Gesetzesbegründung hingegen die vorgelagerte Phase der Herstellung eines Erzeugnisses, denn in der Produktionsphase könne aufgrund von technischen Herstellungsbedingungen der Anfall von Abfall nicht ausgeschlossen werden. Zudem enthält bereits die Verpflichtung des Anlagenbetreibers nach § 5 Abs. 1 Nr. 3 BImSchG ein wirkungsvolles Instrument, um die Abfallerzeugung in der Produktionsphase zu vermindern (so die Gesetzesbegründung, BT-Drs. 19/19373, S. 58).

Dementsprechend kommt es grundsätzlich in Betracht, die Hersteller von Rotorblättern im Rahmen einer Obhutspflicht zu verpflichten, die Gebrauchstauglichkeit der Rotorblätter nach Stilllegung der WEA zu prüfen, sie gegebenenfalls zu erhalten und dafür zu sorgen, dass sie wiedereiterverwendet und damit nicht zu Abfall werden. Das würde allerdings voraussetzen, dass die Prüfung einer Wiederverwendungsmöglichkeit bereits vor Ort am Standort der stillgelegten WEA vorgenommen wird, weil die Rotorblätter nämlich für den Fall, dass ihre Wiederverwendung ausscheidet, in transportfähige Stücke zerkleinert werden soll und danach als tauglicher Gegenstand einer Obhutspflicht ausscheiden.

7.8.5 Verpflichtung zur Rücknahme und Rückgabe von Rotorblättern

Grundsätzlich möglich ist eine Verpflichtung der Hersteller von WEA bzw. von Rotorblättern, die Rotorblätter zurückzunehmen und vorrangig für deren Wiederverwendung im Sinne der Abfallvermeidung zu sorgen oder aber, für den Fall, dass eine Wiederverwendung ausscheiden muss, für eine möglichst hochwertige, ordnungsgemäße und schadlose Verwertung zu sorgen. Nach § 25 Abs. 1 KrWG ist die Bundesregierung zum Erlass einer Rechtsverordnung berechtigt, wonach Hersteller oder Vertreiber

1. bestimmte Erzeugnisse nur bei Eröffnung einer für den jeweiligen Bereich flächendeckenden Rückgabemöglichkeit sowie Sicherstellung der umweltverträglichen Verwertung oder Beseitigung abgeben oder in Verkehr bringen dürfen,
2. bestimmte Erzeugnisse zurückzunehmen und die Rückgabe sowie die umweltverträgliche Verwertung und Beseitigung durch geeignete Maßnahmen sicherzustellen haben, insbesondere durch die Einrichtung von Rücknahmesystemen, die Beteiligung an Rücknahmesystemen, die Erhebung eines Pfandes oder die Gewährung anderer wirtschaftlicher Anreize,
3. bestimmte Erzeugnisse an der Abgabe- oder Abfallstelle oder einer anderen vorgeschriebenen Stelle zurückzunehmen haben.

§ 25 Abs. 2 KrWG ermöglicht außerdem ergänzende Bestimmungen dazu, 1. wer die Kosten für die Sammlung, Rücknahme, Verwertung und Beseitigung, die Kennzeichnung, die Datenerhebung und -übermittlung sowie die Beratung und Information nach § 24 Nr. 9 KrWG zu tragen hat, 2. wie die Kosten festgelegt werden, insbesondere, dass bei der Festlegung der Kosten der Lebenszyklus der Erzeugnisse zu berücksichtigen ist, 3. dass derjenige, der die Kosten zu tragen hat, einen Nachweis darüber zu erbringen hat, dass er über die erforderlichen finanziellen oder finanziellen und organisatorischen Mittel verfügt, um den Verpflichtungen im Rahmen der Produktverantwortung nachzukommen, insbesondere durch Leisten einer Sicherheit oder Bilden betrieblicher Rücklagen, 4. dass derjenige, der die Kosten zu tragen hat, eine geeignete Eigenkontrolle einzurichten und durchzuführen hat zur Prüfung und Bewertung a) seiner Finanzen, einschließlich der Kostenverteilung, und b) der Qualität der Daten, für die eine Nachweisführung nach § 25 Abs. 1 Nr. 7 KrWG verordnet wurde, 5. dass derjenige, der die Kosten zu tragen hat, eine Prüfung der Eigenkontrolle nach Nr. 4 durch einen von der zuständigen Behörde bekannt gegebenen Sachverständigen, eine von dieser Behörde bekannt gegebene Stelle oder eine sonstige Person, die über die erforderliche Fach- und Sachkunde verfügt, durchführen zu lassen hat, 6. dass die Besitzer von Abfällen diese den nach § 25 Abs. 1 KrWG verpflichteten Herstellern, Vertreibern oder nach § 25 Abs. 1 Nr. 2 KrWG eingerichteten Rücknahmesystemen zu überlassen haben, 7. auf welche Art und Weise die Abfälle überlassen werden, einschließlich der Maßnahmen zum Bereitstellen, Sammeln und Befördern und des jeweils gebotenen Umfangs sowie der Bringpflichten der in Nr. 6 genannten Besitzer von

Abfällen, 8. dass die öffentlich-rechtlichen Entsorgungsträger im Sinne des § 20 KrWG durch Erfassung der Abfälle als ihnen übertragene Aufgabe bei der Rücknahme mitzuwirken und die erfassten Abfälle den nach § 25 Abs. 1 KrWG Verpflichteten zu überlassen haben, 9. welche Form, welchen Inhalt und welches Verfahren die Bestellung eines Bevollmächtigten nach § 25 Abs. 1 Nr. 5 KrWG oder eines freiwillig Bevollmächtigten einzuhalten hat, 10. welche Anforderungen an die Verwertung eingehalten werden müssen, insbesondere durch Festlegen abfallwirtschaftlicher Ziele, und 11. dass Daten über die Einhaltung der abfallwirtschaftlichen Ziele nach Nr. 10 sowie weitere Daten über die Organisation und Struktur der Rücknahmesysteme zu erheben und in geeigneter Weise zu veröffentlichen sind.

Der Gesetzgeber hat damit der Bundesregierung ein sehr differenziertes Instrumentarium zur Einführung von Rücknahmepflichten, Rückgabepflichten, Kostentragungspflichten, Dokumentationspflichten, etc. an die Hand gegeben.

Fraglich ist, ob es Anlass für eine Empfehlung gibt, eine Rücknahmeverpflichtung für Hersteller und Vertreiber, eine Rückgabepflicht der Anlagenbetreiber und/oder die Einrichtung eines Rücknahmesystems in einer Verordnung festzulegen bzw. Kostentragungspflichten für Hersteller und Vertreiber einzuführen, die neben oder anstelle der Entsorgungsverpflichtung der Anlagenbetreiber tritt. Empfohlen wird eine Rücknahmepflicht für Rotorblätter z. B. von der LAGA (Abschlussbericht, 2019, S. 31).

Rücknahmepflichten, Rückgabepflichten, die Einrichtung von Rücknahmesystemen, etc. sind erhebliche Eingriffe in den Markt; sie führen auch zu Beeinträchtigungen von Grundrechten der Hersteller und Vertreiber und der Anlagenbetreiber. Nicht zuletzt kann der freie Warenverkehr durch derartige Verpflichtungen zur Produktverantwortung eingeschränkt sein. Dementsprechend schreibt § 23 Abs. 3 KrWG vor, dass im Rahmen der Produktverantwortung insbesondere der Grundsatz der Verhältnismäßigkeit und auch Festlegungen des Unionsrechts über den freien Warenverkehr zu berücksichtigen sind.

Hinzu kommt, dass Rücknahmepflichten von Herstellern langlebiger Erzeugnisse nur sinnvoll sind, wenn die Rücknahmepflichten durch Sicherheitsleistungen der Rücknahmepflichtigen ergänzt werden, um zu gewährleisten, dass nach der Stilllegung der WEA ein Rücknahmepflichtiger überhaupt noch vorhanden und wirtschaftlich zur Rücknahme in der Lage ist. Es nutzt nämlich wenig, eine Rücknahmepflicht von Herstellern und Vertreibern vorzusehen, wenn nicht sichergestellt ist, dass die Rücknahmepflichtigen auch zum Zeitpunkt der Stilllegung der hergestellten und vertriebenen Anlagen noch leistungsfähig existieren. Die Forderung einer Sicherheitsleistung macht insoweit nicht nur Sinn mit Blick auf den Betreiber einer WEA, sondern auch für rücknahmepflichtige Hersteller, Vertreiber oder von ihnen gebildete Rücknahmesysteme. Die Beibringung von Sicherheiten, etwa von Bank- oder Versicherungsbürgschaften, verursacht Kosten und verteuert damit die Windenergie. Mehrkosten der Sicherheitsleistung von Herstellern/Vertreibern ließen sich allerdings dadurch kompensieren, wenn parallel dazu die Betreiber der WEA aus der Entsorgungspflicht und der Verpflichtung, dafür entsprechende Sicherheiten beizubringen, entlassen würden.

Der Grundsatz der Verhältnismäßigkeit verlangt eine Prüfung darauf hin, ob die Einführung der genannten Pflichten der Produktverantwortung gemessen an einem vom Verordnungsgeber festzulegenden, an den Bestimmungen des Gesetzes dazu orientierten Zweck geeignet, erforderlich und angemessen sind. Bei der erforderlichen Gesamtabwägung zwischen der

Schwere des Eingriffs und dem Gewicht der den Eingriff tragenden Gründe steht dem Gesetz- und Verordnungsgeber sowohl hinsichtlich der Einschätzung der Rechtsgutgefährdung als auch der Eignung und Erforderlichkeit des gewählten Mittels ein weiter, an der Eigenart des jeweiligen Sachbereichs zu orientierender Gestaltungs-, Beurteilungs- und Einschätzungsspielraum zu (OVG Berlin, Beschl. v. 20.02.2002 – 2 S 6.01, DVBl. 2002, 631, 636). Eignung und Erforderlichkeit müssen an den gesetzgeberischen Zielen gemessen werden, die sich an dem Schutz der Umwelt, dem Gesundheitsschutz und nicht zuletzt an der Ressourcenschonung orientieren.

7.8.5.1 Rücknahmepflicht

Mit Blick auf den angesprochenen Verhältnismäßigkeitsgrundsatz stellt sich für die grundsätzlich mögliche Einführung einer Rücknahmepflicht für Rotorblätter oder für Teile von ihnen die Frage nach dem Zweck, den der Verordnungsgeber mit der Einführung einer solchen Rücknahmepflicht verfolgen könnte.

Denkbar wäre es grundsätzlich, mit Hilfe einer Rücknahmepflicht die Hersteller und Vertreiber zu motivieren, die Rotorblätter im Sinne einer möglichen Wiederverwendung und einer hochwertigen und schadlosen Verwertung weiterzuentwickeln. Eine Rücknahmepflicht kann auch dazu dienen, eine geeignete Entsorgungsinfrastruktur für die Verwertung der Rotorblätter zu initiieren, wenn davon auszugehen wäre, dass es Lücken in der Entsorgungsinfrastruktur angesichts der zu erwartenden Entsorgungsmengen und deren Materialzusammensetzung auch mit nur schwer recycelbaren Fasern gibt oder zukünftig geben wird. Der Aufbau einer leistungsfähigeren Entsorgungsinfrastruktur könnte insbesondere dann bewirkt werden, wenn die Rotorblätter von einem Rücknahmesystem zurückgenommen werden, das von den Herstellern der WEA und bzw. oder den Herstellern von Rotorblättern gebildet wird und das mit der Verwertung der Rotorblätter qualifizierte Unternehmen beauftragt.

Rücknahmepflichten können nicht zuletzt in Betracht zu ziehen sein, um im Falle der Insolvenz eines Anlagenbetreibers zu vermeiden, dass die Kosten der Entsorgung vom Staat und nicht verursachergerecht vom Anlagenbetreiber oder vom Hersteller/Lieferanten getragen werden.

7.8.5.1.1 Rücknahme und Rückgabe – Begriffliches

Was als Rücknahme im Sinne von § 25 KrWG anzusehen ist, ergibt sich aus dem Gesetz selbst unmittelbar nicht. Die Rücknahme eines Erzeugnisses durch den Hersteller oder Vertreiber bedeutet, dass er das Erzeugnis nach dessen Nutzung durch den Verbraucher körperlich wieder entgegennimmt und die tatsächliche Sachherrschaft über das Erzeugnis wiedererlangt (Beckmann, 2021, § 25 KrWG Rn. 17). Der Rücknahme eines Erzeugnisses steht aber nicht entgegen, dass sich der Rücknahmepflichtige bei der Entgegennahme oder Abholung des Erzeugnisses eines Dritten auf der Grundlage des § 22 KrWG bedient.

Die Rückgabe bedeutet, dass der Besitzer des Erzeugnisses dieses dem Hersteller oder Vertreiber nach Gebrauch wieder zur Verfügung stellt. Natürlich kann sich auch der Besitzer der Erzeugnisse bei einer Rückgabepflicht der Hilfe eines Dritten bedienen. Und natürlich bedeutet Rückgabe nicht zwingend, dass der Abfallbesitzer das Produkt, dessen er sich entledigt, zwingend an den Hersteller oder Vertreiber selbst übergibt. Vielmehr kommt auch die Übergabe an einen vom Hersteller bzw. Vertreiber mit der Rücknahme beauftragten Dritten in Betracht.

Rücknahmepflichten und ggfs. dazu eingerichtete Rücknahmesysteme gelten als besonders effektives Instrument der Kreislaufwirtschaft (Beckmann, 2021, § 25 KrWG Rn. 18; Birn, 1992, S. 419). Idealtypisch gedacht sollen die von der produzierenden Wirtschaft hergestellten und durch den Handel vertriebenen Erzeugnisse nach ihrem Gebrauch im Sinne eines Stoffkreislaufes zu den Vertreibern und Herstellern zurückkehren. Allerdings geht es bei der Einführung von Rücknahmepflichten und entsprechenden Rücknahmesystemen nicht zwingend um eine Kreislaufwirtschaft zur Schließung von Stoffkreisläufen im Sinne der Wiederverwendung der Produkte zu dem Zweck, zu dem sie erzeugt wurden. Die durch den Gesetz- und Verordnungsgeber bereits eingeführten Rücknahmepflichten führen grundsätzlich weder zu einer im Kreis geführten Mehrfachnutzung (etwa von Elektroaltgeräten oder Batterien) noch überhaupt zu einer Rückführung der Abfälle zum Hersteller oder Vertreiber selbst. Denn die Hersteller und Vertreiber können regelmäßig zurückgenommene Erzeugnisse nicht erneut verwenden oder in den Handel zurückgeben. Vielmehr soll das zu Abfall gewordene Produkt in einem Entsorgungsbetrieb verwertet werden.

Etwas anderes gilt neuerdings insbesondere für Retouren des Einzelhandels. § 23 Abs. 2 Nr. 11 KrWG sieht ausdrücklich vor, dass die neue Pflicht des § 23 Abs. 1 S. 2 KrWG, bei einem Vertrieb der Erzeugnisse dafür zu sorgen, dass deren Gebrauchstauglichkeit erhalten bleibt und diese nicht zu Abfall werden, auch im Zusammenhang mit deren Rücknahme oder Rückgabe gilt. Insoweit geht es vor allem um „Retourenvernichtung“, der durch eine möglichst umfassende Weiterverwendung nach dem Verkauf zurückgesandter Waren begegnet werden soll, und um den Erhalt von Erzeugnissen, die nicht verkauft werden konnten (z. B. unverkaufte Modekollektionen der vergangenen Saison). Das sind jedoch Fallgestaltungen, die mit einer möglichen Wiederverwendung von Rotorblättern nach Stilllegung der WEA nicht zu vergleichen sind.

Die Rückgabe von bestimmten Erzeugnissen an den Hersteller oder Vertreiber selbst macht – anders als im Falle der geplanten Weiterveräußerung – ökologisch keinen Sinn, wenn im Ergebnis dadurch Abfälle nur über einen Umweg über den Hersteller zu einer Verwertungsanlage befördert werden oder wenn der Aufwand für die Rücknahme den Nutzen für die Umwelt möglicherweise bei weitem übersteigt (Bundesregierung (BReg) und Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMUV) 1993, S. 133).

Entscheidend ist also nicht unbedingt eine Kreislaufführung im eigentlichen Sinne, sondern dass Hersteller und Betreiber zur Entsorgung im Sinne der Produktverantwortung verpflichtet werden. Sie sollen die Organisationsverantwortung für die Entsorgung übernehmen und diese entweder selbst durchführen oder aber – was dem Regelfall entsprechen dürfte – spezialisierte Entsorgungsunternehmen mit der Entsorgung der zu Abfall gewordenen Erzeugnisse beauftragen. Die Rücknahmepflichten dienen insoweit der Zuweisung einer Organisationsverantwortung und – nicht zwingend – bei entsprechender Regelung auch der Zurechnung der dafür entstehenden Entsorgungskosten.

Dass Hersteller und Vertreiber diese Kosten auf ihre Kunden bzw. auf die Verbraucher abwälzen, ist offenkundig und vom Gesetz- und Verordnungsgeber durchaus gewollt. Da der Hersteller mit seinen Produktionskosten aber im Wettbewerb bestehen muss, soll er sich über die Zuweisung der Entsorgungsverantwortung bereits bei der Produktherstellung bzw. bei dem Produktvertrieb darauf einstellen, dass die Entsorgungskosten eines Tages auf ihn zukommen werden, wenn eine Kostentragungspflicht durch den Gesetz- und Verordnungsgeber vorgesehen

ist. Das soll Hersteller und Vertreiber veranlassen, bereits bei der Herstellung die späteren Entsorgungskosten zu berücksichtigen bzw. in den Preis einzukalkulieren. Auch der für den Vertrieb verantwortliche Handel soll zu Verhaltensänderungen veranlasst werden.

Für die Einführung von Rücknahmepflichten zu den genannten Zwecken eignen sich nicht alle Erzeugnisse. Das gilt insbesondere für Erzeugnisse, die bei ihrer Nutzung verbraucht werden (z. B. Lebensmittel). Die neue Obhutspflicht bezieht sich insoweit auch nicht auf zurückgenommene, sondern auf nicht verkaufte Lebensmittel. Des Weiteren kommt die Einführung von Rücknahmesystemen unter Berücksichtigung des Verhältnismäßigkeitsgrundsatzes wohl nur für solche Erzeugnisse in Betracht, die in einer ausreichenden Menge anfallen und die aufgrund ihrer vergleichbaren Eigenschaften (Inhaltsstoffe, Zusammensetzung, Gestalt, etc.) für einen einheitlichen Rücknahmeweg geeignet sind. In diesem Sinne sind bestimmte Produktbereiche für die Einführung von Rücknahmepflichten und Rücknahmesystemen besonders prädestiniert. Dazu zählen z. B. Altbatterien, Altöl, Altautos, Elektroaltgeräte und Verpackungsabfälle.

7.8.5.1.2 Verhältnismäßigkeit einer Rücknahmepflicht für Rotorblätter

Rücknahmepflichten sind ein Eingriff in die Berufsausübungsfreiheit der Hersteller aus Art. 12 Abs. 1 GG (BVerwG, Urt. v. 26.11.2009 – 7 C 20/08, juris Rn. 14). Nach § 23 Abs. 3 KrWG ist im Rahmen der Produktverantwortung insbesondere auch die Verhältnismäßigkeit der Anforderungen entsprechend § 7 Abs. 4 KrWG zu berücksichtigen. Vor der Einführung einer Rücknahmepflicht für Rotorblätter wäre deshalb zu prüfen, ob und inwieweit eine solche Rücknahmepflicht für den Zweck, eine ordnungsgemäße und schadlose, der Abfallhierarchie entsprechende hochwertige Verwertung der Rotorblätter sicherzustellen, geeignet, erforderlich und angemessen ist. Die Verhältnismäßigkeitsprüfung des § 23 Abs. 3 KrWG setzt eine Prüfung der Eignung, Erforderlichkeit und Angemessenheit voraus.

Ob und inwieweit eine Rücknahmepflicht im vorgenannten Sinne geeignet ist, hängt ab von dem Zweck, dem die Rücknahmepflicht dienen soll. Dieser ist vom Verordnungsgeber zu bestimmen.

Die Einführung einer Rücknahmepflicht und damit verbundene Zuweisung der Entsorgungsverantwortung für Rotorblätter an Hersteller und Vertreiber könnte zum Ziel haben, dass die Hersteller bereits bei der Herstellung der Rotorblätter darauf hinwirken, dass die Kosten der späteren Entsorgung möglichst gering bleiben und dass die Entsorgung der Rotorblätter möglichst problemlos ordnungsgemäß, schadlos und hochwertig vonstattengehen kann. Eine solche Motivation könnte positiven Einfluss auf die Konstruktion und die Auswahl der verwendeten Stoffe und Materialien der Rotorblätter haben. Gegenüber konkreten Vorgaben zur Produktgestaltung hätte eine solchermaßen mittelbar wirkende Motivierung der Hersteller den Vorzug, dass ihnen die Freiheit bleibt, im Wettbewerb mit anderen Herstellern ein auch unter Entsorgungsgesichtspunkten möglichst günstiges Produkt zu entwickeln. Zudem würde damit der Verordnungsgeber der Notwendigkeit enthoben, kontinuierlich oder zumindest in regelmäßigen zeitlichen Abständen seine Anforderungen an die Rotorblattproduktion nachzubessern, um dem Fortschritt der technischen Entwicklung Rechnung zu tragen. Nicht zuletzt wäre bei einer Rücknahme der Rotorblätter durch die Hersteller gesichert, dass möglicherweise als Betriebsgeheimnis deklarierte Informationen über die Produktgestaltung und Stoffinhalte für die Entsorgung zur Verfügung stehen bzw. nicht veröffentlicht werden müssen.

Geeignet wäre die Einführung einer Rücknahmepflicht zu dieser Zwecksetzung aber nur, wenn das beschriebene Entwicklungspotential für eine verbesserte Möglichkeit der Entsorgung bei der Konstruktion und Herstellung der Rotorblätter nicht nur völlig abstrakt angenommen wird, sondern mit einer hinreichenden Prognosewahrscheinlichkeit auch zu erwarten ist.

Ein weiteres Ziel der Einführung einer Rücknahmepflicht könnte darin bestehen, mit Hilfe eines solchen Rücknahmesystems sicherzustellen, dass eine für die Aufbereitung und Verwertung der Rotorblätter geeignete Entsorgungsinfrastruktur geschaffen bzw. ergänzt wird. Ein Rücknahmesystem, das für die ihm angeschlossenen und entsorgungsverantwortlichen Hersteller mit Hilfe von qualifizierten Entsorgungsunternehmen eine Aufbereitung und Verwertung der Rotorblätter organisiert, könnte gegebenenfalls einem Missstand abhelfen, dass nicht alle derzeit für die Entsorgung der Rotorblätter verantwortlichen Anlagenbetreiber geeignete Aufbereitungsanlagen für die von iIhnen zu entsorgenden Rotorblätter finden.

Ob die Einführung einer Rücknahmepflicht für Rotorblattabfälle zu den vorgenannten Zwecken nicht nur geeignet, sondern auch erforderlich wäre, hängt davon ab, ob mit Hilfe einer solchen Rücknahmepflicht tatsächlich eine entsorgungsfreundlichere Konstruktion und Materialverwendung bei der Herstellung von Rotorblätter initiiert werden kann, ob es – wie angenommen – tatsächlich schließungsbedürftige Lücken der Entsorgungsinfrastruktur für die Aufbereitung und Verwertung von Rotorblätter gibt und ob diese Lücken tatsächlich dann besser geschlossen werden können, wenn eine Rücknahmepflicht gegenüber einem Rücknahmesystem besteht.

Die nach § 23 Abs. 3 KrWG geforderte Verhältnismäßigkeitsprüfung setzt schließlich noch voraus, dass die Rücknahmepflicht Hersteller und Vertreiber nicht unangemessen nachteilig betrifft. Angemessenheit in diesem Sinne kann im vorliegenden Zusammenhang so verstanden werden, dass bei einer wirtschaftlichen und ökologischen Betrachtung der Rücknahmepflicht die nachteiligen Folgen der Rücknahmepflicht für die Hersteller nicht außer Verhältnis zur ökologischen und entsorgungsspezifischen Bedeutung einer solchen Rücknahmepflicht für die Zweckverfolgung steht.

Bei der insoweit geforderten Abwägung sind ganz verschiedene Aspekte beachtlich: Dazu gehören die Wahrscheinlichkeit der Erreichung des mit der Rücknahmepflicht verfolgten Zweckes einerseits und die Effizienz der Rücknahmepflicht für die Erreichung dieser Zielsetzung andererseits eine Rolle. Je größer und sicherer der Effekt einer Einführung einer Rücknahmepflicht für eine hochwertige, ordnungsgemäße und schadlose Verwertung der Rotorblätter ist, umso größer ist auch das Gewicht dieses Interesses im Rahmen einer Angemessenheitsprüfung.

Zum anderen sind einige gewichtige Nachteile oder Bedenken bei der Einführung einer solchen Rücknahmepflicht in die Überlegungen einzustellen. So hat z. B. die Einrichtung eines Rücknahmesystems, wenn sich diesem Rücknahmesystem sämtliche Hersteller und Vertreiber anschließen sollen oder müssen, einen negativen Einfluss auf den Wettbewerb, weil die Entsorgungsdienstleistungen für die Aufbereitung und Verwertung von Rotorblättern für dieses Rücknahmesystem dann nicht im freien Wettbewerb, sondern im Rahmen einer öffentlichen Ausschreibung vergeben werden. Ob allerdings die Einrichtung eines einzigen Rücknahmesystems erforderlich wäre, ob den Herstellern und Vertreibern die Wahl gelassen werden könnte, einem solchen System beizutreten oder seinen Rücknahme- und

Entsorgungspflichten eigenständig nachzukommen, hängt von einer Einschätzung der Marktgegebenheiten ab. Selbst wenn es kein einheitliches Rücknahmesystem der Hersteller und Vertreiber gäbe, sondern entweder mehrere Systeme eingerichtet oder die einzelnen Hersteller und Vertreiber selbst die Entsorgungsverantwortung für rücknahme- und rückgabepflichtige Rotorblätter oder einzelner Fraktionen dieser Rotorblätter übernähmen, hätte dies erhebliche Auswirkungen auf den Wettbewerb, weil sich die Zahl der Nachfrager für die entsprechende Entsorgungsdienstleistung ganz erheblich verringern würde.

Nach der Datenaufbereitung und der ergänzenden Betrachtung von Übernahmen einzelner Hersteller, konnten in Kapitel 2 (2.3.2.3) fünf WEA-Hersteller identifiziert werden, die den Markt bzw. den aktuell im Betrieb befindlichen Bestand an WEA in Deutschland dominieren. Diese fünf Hersteller haben mindestens 73 % der im Betrieb befindlichen Anlagen hergestellt. Es mag durchaus denkbar sein, dass die großen Hersteller in der Lage sind, einer Rücknahmepflicht eigenständig nachzukommen und auch entsprechende Sicherheiten zu stellen. Die individuelle Rücknahme wäre möglicherweise vor allem dann im Interesse des Herstellers, wenn er sein Herstellerwissen möglichst weitgehend schützen will und nur die eigenen Mitarbeiter mit dem Zerlegen der Anlage betrauen möchte. Ob allerdings auch kleinere Herstellerfirmen dazu in der Lage wären, mag man bezweifeln, sodass man ggfs. auch daran denken könnte, Rücknahmepflichten einzuführen und die Möglichkeit zu einem Zusammenschluss in einem Rücknahmesystem zu schaffen, ohne den einzelnen Hersteller oder Betreiber zu einem Beitritt zu verpflichten.

Zu möglichen Einwänden gegen die Einführung einer Rücknahmepflicht mit Blick auf den zu beachtenden Grundsatz der Verhältnismäßigkeit und möglichen Wettbewerbsbeeinträchtigungen kommt hinzu, dass ein eigenständiges Rücknahme- und Entsorgungssystem sich möglicherweise deshalb als nicht optimal erweist, weil es auch andere Produkte gibt, in denen z. B. Glasfasern und Carbonfasern verarbeitet worden sind, die insoweit sinnvollerweise auch auf einem gemeinsamen Entsorgungsweg verwertet werden sollten. Das beginnt damit, dass Glas- und Carbonfasern in WEA nicht ausschließlich in den Rotorblättern verarbeitet werden, sondern auch in anderen Anlagenteilen, wenn auch in geringerem Umfang vorhanden sind. Hinzu kommt, dass WEA lediglich einen Anteil von etwa 13 % des Anwendungsbereichs von Carbonfasern und bei Glasfasern der Bau- und Infrastrukturanteil, zu dem WEA gerechnet werden, lediglich etwa 1/3 des Anwendungsbereichs ausmacht. Eine Rücknahmepflicht für faserhaltige Rotorblätter würde insoweit nur einen zwar nicht unbedeutenden, gleichwohl aber lediglich untergeordneten Stoffstrom betreffen. Das wirft nicht nur die Frage auf, ob eine über die Rotorblätter hinausgehende Rücknahmepflicht für faserhaltige Abfälle vorzugswürdig wäre, und ob für den Fall, dass man sich tatsächlich auf Rotorblattabfälle beschränken wollte, der Gleichheitsgrundsatz beachtet wäre, ob also die Beschränkung auf diesen Stoffstrom willkürfrei wäre.

Ob und inwieweit Hersteller und Vertreiber durch die Einführung einer Rücknahmepflicht belastet werden, hängt nicht zuletzt sehr stark von der konkreten Ausgestaltung der Rücknahmepflicht ab, insbesondere davon, ob die rücknahmepflichtigen Hersteller die Kosten der Entsorgung tragen sollen, ob die Rücknahmepflicht auch für bereits hergestellte und schon vertriebene Rotorblätter gelten soll und wo genau die Schnittstellen zur verbleibenden Betreiberverantwortung liegen sollen (z. B. Ort der Rücknahme, Zustand der zurückzunehmenden Rotorblätter, demontiert, zerkleinert, etc.).

Für die im Rahmen der Verhältnismäßigkeitsprüfung gebotene Angemessenheitsprüfung ist außerdem von entscheidender Bedeutung, ob die Rücknahmepflicht mit einer Kostentragungspflicht für den rücknahmepflichtigen Hersteller oder Vertreiber verbunden sein soll. Zwingend ist das nicht. Der SRU erläutert dazu, je nach Ausgestaltung der Systeme zur Sammlung, Behandlung und Verwertung entstünden den Herstellern unterschiedliche Kosten (SRU, 2020, S. 123). Ob und ggfs. welche Kosten für Hersteller und Vertreiber entstünden, hänge vom logistischen Aufwand der Sammlung, der Art der Behandlung und den Erlösen der Sekundärrohstoffe sowie gegebenenfalls notwendiger Verwertungs- und Beseitigungsmaßnahmen ab. In einigen Fällen, wie zum Beispiel der Produktverantwortung für Fahrzeuge, trügen die Hersteller keine Kostenverantwortung. In anderen Fällen, wie zum Beispiel der Entsorgung von Kühlgeräten, seien Kosten von Herstellern zu tragen. Daneben gebe es auch den Fall, dass die Erlöse die Kosten übersteigen und die Hersteller einen Gewinn aus der Verwertung erzielen würden. Der SRU nennt dazu das Beispiel der Informations- und Kommunikationstechnologien.

Der SRU empfiehlt, rechtliche Regelungen sollten so entwickelt und implementiert werden, dass die Hersteller für die Erreichung der Zielvorgaben zur Erfassung verantwortlich sind. Die finanziellen Beteiligungen sollten so geregelt werden, dass die Kosten einer Kreislaufwirtschaft auch tatsächlich durch die Produktverantwortlichen getragen und transparent im Produktpreis ausgewiesen würden. Dies betreffe sowohl die Kosten der Erfassung als auch der Behandlung (SRU, 2020, S. 170).

Für den Fall, dass der Hersteller bzw. Vertreiber die Rotorblätter nur zurücknehmen muss, wenn sich der Anlagenbetreiber bereit erklärt, die dann anfallenden Entsorgungskosten zu übernehmen, ist die Beeinträchtigung der Berufsausübungsfreiheit der Hersteller aus Art. 12 Abs. 1 GG natürlich deutlich geringer. Bleibt der Anlagenbetreiber kostenverantwortlich, stellt sich die Frage nach der Notwendigkeit einer Rückgabepflicht.

Soll der Hersteller/Vertreiber die Rotorblätter kostenlos zurücknehmen, wird für ihn die Frage, ob die Rücknahmepflicht sich auf von ihm bereits hergestellte bzw. vertriebene WEA erstrecken soll, relevant, was zur Konsequenz hätte, dass er die Entsorgungskosten nicht bei der Preiskalkulation der zu entsorgenden Rotorblätter einkalkulieren konnte. Bei Massenprodukten mit geringer Lebensdauer kann dem bereits mit einer relativ kurzen Übergangsfrist Rechnung getragen werden. Bei Rotorblättern mit einer Lebensdauer von 20 bis 25 Jahren wäre eine rückwirkende Rücknahmepflicht mit Kostenübernahme sehr einschneidend. Man könnte deshalb daran denken, die Rücknahmepflicht der Hersteller/Vertreiber mit einer Rückgabepflicht der Anlagenbetreiber zu verbinden und diese zu verpflichten, für Anlagen, die vor einem Stichtag hergestellt oder vertrieben worden sind, die Kosten der Entsorgung ganz oder teilweise zu tragen, und für nach dem Stichtag hergestellte oder vertriebene WEA die Kosten der Entsorgung der rücknahmepflichtigen Abfälle den Herstellern/Vertreibern zuzuordnen.

Aber auch wenn sich die Rücknahmepflicht nicht auf bereits in den Verkehr gebrachte Rotorblätter beziehen soll, ergeben sich für den Hersteller bei einer kostenpflichtigen Rücknahme erhebliche Kalkulationsrisiken. Angesichts der Langlebigkeit der Rotorblätter, der Dynamik der technischen Entwicklung und der sich ändernden rechtlichen Anforderungen an die Entsorgung dürfte die Prognose auf die späteren Entsorgungskosten, die anders als bei der Sicherheitsleistung für die öffentliche Hand nicht zu späteren Zeitpunkten vom Hersteller

nachkalkuliert werden kann, weil sie bei der Preisgestaltung zum Zeitpunkt des Verkaufs einkalkuliert werden muss, sehr schwerfallen. Der Hersteller trägt insoweit das Risiko, Entsorgungskosten für die Rotorblätter zu einem späteren Zeitpunkt tragen zu müssen, ohne deren Höhe zu diesem Zeitpunkt bereits abschließend kalkulieren zu können. Wirtschaftlich unzumutbar dürfte dieses Kalkulationsrisiko grundsätzlich allerdings nicht sein. Denn dieses Risiko unterscheidet sich nicht von dem entsprechenden Risiko des Anlagenbetreibers, der für die Entsorgungskosten gerade zu stehen hat und entsprechende Sicherheiten leisten muss. Bei einer kostenfreien Rückgabe der Rotorblätter könnten deren Entsorgungskosten aus der Kalkulation der erforderlichen Sicherheitsleistung des Anlagenbetreibers herausgenommen und díe Kalkulation einer Sicherheitsleistung des Herstellers eingefügt werden.

Für den Anlagenbetreiber kommt es darauf an, ob die Rücknahmepflicht des Herstellers bzw. Vertreibers mit einer Rückgabepflicht des Anlagenbetreibers einhergeht. Kann oder muss er die Rotorblätter kostenlos zurückgeben, wird er also von der Entsorgungsverantwortung befreit, wird man kaum von einer unverhältnismäßigen Beeinträchtigung seiner Grundrechte sprechen können. Wird er allerdings verpflichtet, die Rotorblätter an den Hersteller zurückzugeben, wird ihm also das Recht genommen, den Entsorger selbst auszuwählen, und muss er dennoch ein angemessenes Entsorgungsentgelt des Herstellers akzeptieren, dann liegt eine wesentliche Beeinträchtigung seiner Grundrechte, seiner Berufsausübungsfreiheit und seines Eigentumsrechts vor.

Für die Verhältnismäßigkeit einer Rücknahmepflicht des Herstellers einer WEA ist auch bedeutsam, an welchem Ort er die Rotorblätter zurücknehmen muss, ob er sie am Standort der stillgelegten WEA in Empfang nehmen muss oder ob er sie an einem von ihm zu bestimmenden Übergabeort (Vorbehandlungsanlage/Zwischenlager/Verwertungsanlage) übernehmen muss. Im letzteren Fall bliebe der Anlagenbetreiber für die Demontage der Rotorblätter und für deren Beförderung zu dem von dem Hersteller zu benennenden Übergabeort verantwortlich. Regelungsbedürftig wäre insoweit allerdings, welcher Transportweg dem Anlagenbetreiber zugemutet werden kann. Möglicherweise könnte auch insoweit eine Kostenteilung infrage kommen, wenn der von dem Hersteller benannte Übergabeort eine bestimmte Entfernung vom Standort der WEA überschreitet.

Für die Lastenverteilung zwischen Anlagenbetreiber und Hersteller/Vertreiber ist auch von Bedeutung, in welchem Zustand die Rotorblätter von Herstellern und Vertreibern zurückgenommen werden müssen. Abhängig von der Art und Weise der Demontage und der Zerlegung vor Ort kommt eine Rücknahme ganzer Rotorblätter (mit aufwändigem Transport) oder aber bereits in bestimmter Weise zerlegter Rotorblätter, schließlich möglicherweise sogar bereits in bestimmter Weise vorsortierter Rotorblattfraktionen in Betracht. In dem Umfang, in dem eine Zerlegung der Rotorblätter noch vom Anlagenbetreiber durchzuführen ist, würde die Beeinträchtigung der Rechtsposition der Hersteller durch die Rücknahmepflicht geringer ausfallen.

Die Kosten und der Bürokratieaufwand, der mit der Einführung von Rücknahmepflichten für Rotorblätter verbunden wäre, hängt unter anderem auch davon ab, ob ein Rücknahmesystem der Hersteller und Vertreiber eingerichtet werden muss und ob das Rücknahmesystem eine Abholung der Rotorblätter zu übernehmen hat, ob und inwieweit staatliche Leistungen, etwa für die Registrierung von Herstellern, für Bereitstellungs- und Abholanordnungen etc. und eine dazu notwendige Gebührenerhebung notwendig werden.

In der Vergangenheit wurden unterschiedliche Konzepte zur Produktverantwortung realisiert (siehe dazu Giesberts, 2018, Einleitung, Rn. 23 f.). Zur umweltgerechten Verwertung von Altautos gab die Automobilindustrie zunächst eine freiwillige Selbstverpflichtung ab, die durch eine Altautoverordnung aus dem Jahr 1997 ergänzt wurde (siehe dazu Giesberts und Hilf 1998). Durch die spätere AltfahrzeugV wurden im Jahre 2002 die Autohersteller verpflichtet, ein flächendeckendes System von Rückgabemöglichkeiten aufzubauen. Auch für Altbatterien gab es im ersten Schritt eine freiwillige Vereinbarung der Wirtschaft zur Entsorgung, zu deren Erfüllung die Hersteller eine Arbeitsgemeinschaft Altbatterien gegründet hatten, die die Rücknahme und Verwertung organisierte. Mit Erlass der Batterieverordnung von 1998 wurde diese Selbstverpflichtung allerdings durch den Verordnungsgeber festgeschrieben. Die Verpackungsverordnung räumte die Möglichkeit der Beteiligung an einem von der Wirtschaft privatrechtlich errichteten kollektiven System nach § 6 Abs. 3 VerpackV ein, die bei Erreichung u. a. von bestimmten Verwertungsvorgaben zur Befreiung von den individuellen Rücknahme- und Verwertungspflichten führt. Kollektive Systeme der Hersteller kennen auch das BattG und die AltfahrzeugV. Demgegenüber sieht das ElektroG nicht nur die Möglichkeit der Hersteller vor, sich an kollektiven Systemen zur Erfüllung ihrer Rücknahme- und Entsorgungspflichten zu beteiligen, sondern verpflichtet die Hersteller, eine Gemeinsame Stelle zu errichten, der eine zentrale Funktion zu der Umsetzung des Gesetzes zukommt.

Nicht nur die Frage, ob sich Hersteller und Vertreiber zu einem Rücknahmesystem zusammenschließen dürfen oder gar müssen ist zu bedenken, sondern im Anschluss dazu auch die weitere Frage, ob die Beteiligung an einem solchen Rücknahmesystem von einer individuellen Rücknahmepflicht befreit oder ob das Rücknahmesystem lediglich als beauftragter Dienstleister oder Erfüllungsgehilfe tätig wird und den rücknahmepflichtigen Hersteller oder Vertreiber nicht aus der Rücknahmepflicht befreit.

Als Modellregelung könnte auch § 7a ElektroG in Betracht gezogen werden. Diese zum 01.01.2022 in Kraft tretende getretene Neuregelung sieht vor, Hersteller zu verpflichten, ein Rücknahmekonzept vorzulegen. Jeder Hersteller soll verpflichtet werden, der zuständigen Behörde für die Rücknahme und Entsorgung der Elektro- und Elektronikgeräte, für die er glaubhaft macht, dass sie ausschließlich in anderen als privaten Haushalten genutzt werden oder dass solche Geräte gewöhnlich nicht in privaten Haushalten genutzt werden, ein Rücknahmekonzept vorzulegen. Das Rücknahmekonzept muss je Geräteart die folgenden Angaben enthalten: 1.eine Erklärung über die durch den Hersteller oder im Fall der Bevollmächtigung nach § 8 ElektroG durch den Bevollmächtigten erfolgte Einrichtung von den Anforderungen des § 19 Abs. 1 Satz 1 ElektroG entsprechenden Rückgabemöglichkeiten, 2. im Fall der Beauftragung eines Dritten: Name und Adresse des Dritten, 3. die Zugriffmöglichkeit der Endnutzer auf die Rückgabemöglichkeiten nach Nr. 1. Änderungen am Rücknahmekonzept sind der zuständigen Behörde unverzüglich mitzuteilen.

Für den Hersteller, der für die Entsorgungskosten gerade zu stehen hat, sind natürlich auch die Anforderungen an die Aufbereitungsanlagen und die Verwertungsanlagen von großer Bedeutung, weil davon auch die Höhe der Entsorgungskosten abhängt. Der Verordnungsgeber kann vorsehen, dass eine Rücknahme von Rotorblättern ausschließlich durch in spezifischer Weise zertifizierte Behandlungsanlage zulässig ist. Es ist davon auszugehen, dass es sich bei den Aufbereitungsanlagen für Rotorblätter um Entsorgungsfachbetriebe handeln wird, die bereits zertifiziert sind, sodass jedenfalls die Erweiterung ihrer Zertifizierung im Hinblick auf die Besonderheiten der Entsorgung von Rotorblättern in Betracht kommt.

7.8.5.1.3 Gleichbehandlungsgrundsatz

Aus dem Gleichbehandlungsgrundsatz des Art. 3 Abs. 1 GG könnten sich Einwände gegen eine Rücknahmepflicht für Rotorblätter ergeben, wenn nicht nachvollziehbar begründet würde, warum sich die Rücknahmepflicht auf Rotorblätter beschränkt und sich nicht auf weitere Produkte erstreckt, in denen ähnlich umweltrelevante Stoffe verarbeitet werden. Das gilt z. B. für die weiteren Produktionsbereiche, in denen Carbon- oder Glasfasern in noch größerem Umfang verbaut werden. Die wichtigste Nachfrage nach Carbonfaser-Verbundwerkstoffen stammt derzeit aus der Luft- und Raumfahrt inkl. Verteidigung mit etwa 30 %, gefolgt vom Fahrzeugbau mit etwa 22 %. Die Windenergie hat einen Anteil von ca. 13% an der Nachfrage nach Carbonfaser-Verbundwerkstoffen (siehe dazu den Abschlussbericht der LAGA zur Entsorgung faserhaltiger Abfälle, Juli 2019, S. 13). Im Bereich der Glasfaser-Verbundstoffe wird nach den Erkenntnissen der LAGA ein Drittel der Produktionsmenge für den Bau- und Infrastruktursektor, darin enthalten auch WEA, hergestellt (LAGA, 2019, S. 38). GFK werde in relevantem Umfang für Rotorblätter von WEA verwendet. Die Windenergiebranche sei insbesondere aufgrund der öffentlichen Diskussion über Entsorgungsschwierigkeiten ausgedienter WEA sowie aufgrund der hohen Massenkonzentration von besonderer Bedeutung, wenngleich die Gesamtmasse verglichen mit der Automobilbranche eher von nachgeordneter Bedeutung sei. In WEA würden GFK hauptsächlich in den Rotorblättern und Maschinenhäusern verbaut. Der Bundesverband Windenergie e.V. schätze die Masse der in Deutschland im Jahr 2016 zugebauten Rotorblätter auf etwa 47.000 t. Ausgehend von einem in heutigen Rotorblättern üblicherweise verbauten GFK-Anteil von 70% lasse sich anhand dieser Zahlen für die vergangenen Jahre ein GFK-Zubau in deutschen WEA von rund 30.000 t ableiten. Glasfaserabfälle aus Rotorblättern schätzt die LAGA auf rund 11.000 t/a (LAGA, 2019, S. 40).

Der Gesetz- und Verordnungsgeber ist allerdings auch durch den Gleichheitsgrundsatz nicht daran gehindert, aus Gründen der Praktikabilität pauschale Maßstäbe zu wählen und sich mit einer Typengerechtigkeit zu begnügen (BVerfG, Beschl. v. 18.05.1971 - 1 BvL 7, 8/69 - BVerfGE 31, 119, 131 ff.).

7.8.5.1.4 Rückwirkungsverbot

Im Abschlussbericht wird auch dazu Stellung genommen, ob eine Rücknahmepflicht für bereits produzierte und im Einsatz befindliche Rotorblätter gegen das aus dem Rechtsstaatsprinzip hergeleitete Verbot rückwirkender belastender Eingriffe in bestehende subjektive Rechte verstoßen würde (BVerfG, Beschl. v. 08.06.1977 - 2 BvR 499/74 u. a. - BVerfGE 45, 142, 167 f.). Zu bedenken ist dabei, dass Hersteller und Vertreiber Kosten, die sich aus einer Rücknahme von Rotorblättern für die Entsorgung ergeben können, nicht in die Preise einkalkulieren konnten, wenn und soweit eine Rücknahmepflicht auch für bereits von den Anlagenbetreibern gekaufte Exemplare gelten soll.

Nach der Rechtsprechung des BVerfG sind Änderungen eines in der Vergangenheit begründeten und noch bestehenden Rechtsverhältnisses für die Zukunft zulässig, wenn die Interessen der Allgemeinheit, die mit der Regelung verfolgt werden, das Vertrauen des Einzelnen auf die Fortgeltung der Rechtslage überwiegen (BVerfG, Entsch. v. 23.06.1993 – 1 BvR 133/89, BVerfGE 89, 48, 66).

Teilweise wurde in der Vergangenheit unter Verweis auf das Rückwirkungsverbot eine Rücknahmepflicht für bereits in Verkehr gebrachte Produkte abgelehnt (Beckmann 1995, S. 317; Weidemann 1995, S. 634; Fluck 1992, S. 194; siehe auch Prelle 2019, 2019, § 23 KrWG Rn. 10).

Allerdings hat der VGH München in einem Urteil zu dem Rücknahmesystem nach dem ElektroG vom 13.3.2008 die Auffassung vertreten, dass eine Rücknahmepflicht für Elektrogeräte, die sich auch auf historische Altgeräte erstreckt, keine echte, sondern lediglich eine unechte Rückwirkung ist und diese unechte Rückwirkung für als verfassungskonform anerkannt (VGH München, Urt. v. 13.03.2008 – 20 BV 07.2359, juris Rn. 35). Eine echte Rückwirkung liege nicht vor, weil der Gesetzgeber nicht nachträglich in einen abgeschlossenen Sachverhalt ändernd eingegriffen habe und Rechtsfolgen nicht für einen vor der Verkündung liegenden Zeitpunkt aufträten, sondern für einen nach oder mit der Verkündung beginnenden Zeitraum. Die Vorschriften des ElektroG knüpften nicht an in der Vergangenheit abgeschlossene Sachverhalte an, sondern an gegenwärtige Gegebenheiten, nämlich die aktuelle Marktteilnahme. Darin könne lediglich eine bloße unechte Rückwirkung gesehen werden, die zulässig sei, weil ein schützenswertes Vertrauen der Hersteller auch angesichts der Umsetzung der Richtlinien 2002/96/EG und 2002/95/EG jeweils vom 27. Januar 2003 in nationales Recht durch Gesetz vom 16. März 2005 nicht vorliege.

Diese Sichtweise ist vom BVerwG in dem sich anschließenden Revisionsurteil vom 26.11.2009 nicht beanstandet worden. Die Einführung einer Rücknahmepflicht für bereits in den Handel gelangte Produkte hat das BVerwG im Falle der sogenannten historischen Geräte für den Bereich des ElektroG als verfassungsmäßig bestätigt, wenn aktuell in Verkehr gebrachte, langlebige Geräte auch in Zukunft einer Rücknahmepflicht unterliegen. Eine so ausgestaltete Rücknahmepflicht sei Ausdruck eines Generationenvertrags zugunsten der Allgemeinheit und der Umwelt (siehe dazu auch Webersinn 2019, 2019, § 23 KrWG Rn. 90; Mann, 2019, § 23 KrWG Rn. 29 f.).

Dementsprechend müsste auch die Einführung einer Rücknahmepflicht für Rotorblätter, die bereits installiert sind, nicht zwingend am Verbot einer echten Rückwirkung scheitern, wenngleich jedoch der Hinweis, dass die Produktverantwortung mittlerweile bereits seit Jahrzehnten im KrWG bzw. den Vorgängergesetzen vorgesehen sei, nicht ausreichend sein dürfte, den Vertrauensschutz der Hersteller, nicht für die Entsorgung der von ihnen hergestellten Produkte verantwortlich gemacht zu werden, vollständig zu beseitigen (in diese Richtung Brinktrine 2019, 2019, § 24 KrWG Rn. 20; Tünnesen-Harmes, 2014, § 23 KrWG Rn. 79). Möglicherweise muss allerdings differenziert werden: Eine individuelle Rücknahmepflicht, die Hersteller und Vertreiber von Rotorblättern verpflichtet, Rotorblätter, die in den vergangenen Jahren hergestellt und in den Verkehr gebracht worden sind, zurückzunehmen und auf eigene Kosten zu entsorgen, dürfte weiterhin verfassungsrechtlich zweifelhaft sein, soweit für die Rücknahmepflicht auf den Sachverhalt abgestellt wird, dass der Hersteller das entsprechende Rotorblatt in der Vergangenheit hergestellt bzw. veräußert hat. Werden Hersteller von Rotorblättern hingegen verpflichtet, sich an einem Rücknahmesystem zu beteiligen und würde dazu darauf abgestellt, dass diese Beteiligung sich aus der Teilnahme des Herstellers an dem entsprechenden Markt ergibt, würde nicht an einen in der Vergangenheit abgeschlossenen Sachverhalt angeknüpft. Allerdings wäre angesichts der Langlebigkeit der Rotorblätter und der hohen Entsorgungskosten die Situation nicht ohne weiteres vergleichbar mit der Rücknahmepflicht für historische Altgeräte auf der Grundlage des ElektroG.

Hinzu kommt, dass es sich bei den WEA um immissionsschutzrechtlich genehmigte, gewerblich genutzte Anlagen handelt, für die die Anlagenbetreiber nachsorgepflichtig sind und sich in großem Umfang auch ausdrücklich zum Rückbau verpflichtet haben. Es wäre insoweit zweifelhaft, ob man für die Entsorgung dieser Rotorblätter nunmehr die Hersteller nachträglich

noch verantwortlich machen könnte, ohne gegen das Rückwirkungsverbot und auch ohne gegen den Verhältnismäßigkeitsgrundsatz zu verstoßen, weil angesichts der Rückbauverpflichtungen der Anlagenbetreiber eine solche Rücknahme durch die Hersteller nicht erforderlich sein dürfte.

7.8.5.2 Rückgabepflicht

Nach § 25 Abs. 2 Nr. 2 KrWG kann der Verordnungsgeber bestimmen, dass die Besitzer von Abfällen diese dem nach § 25 Abs. 1 KrWG verpflichteten Herstellern, Vertreibern oder eingerichteten Rücknahmesystemen zu überlassen haben. Die Art und Weise der Überlassung, einschließlich der Maßnahmen zum Bereitstellen, Sammeln und Befördern sowie Bringpflichten der unter § 25 Abs. 1 Nr. 1 KrWG genannten Besitzer können auf der Grundlage des § 25 Abs. 2 Nr. 3 KrWG geregelt werden. Soweit der Gesetzgeber an dieser Stelle von einer Pflicht zur Überlassung spricht, handelt es sich der Sache nach um nichts anderes als um eine Rückgabepflicht im Sinne von § 23 Abs. 2 Nr. 4 KrWG. Wird eine solche Rückgabepflicht nicht angeordnet, dann hat der Abfallbesitzer grundsätzlich ein Wahlrecht. Er kann angesichts einer bestehenden Rücknahmepflicht die Abfälle dem Rücknahmepflichtigen überlassen. Er ist jedoch dazu nicht verpflichtet. Vielmehr kann er grundsätzlich auch – ohne dazu verpflichtet zu sein – die Abfälle einem von ihm beauftragten Entsorgungsunternehmen überlassendem öffentlich-rechtlichen Entsorgungsträger überlassen. Obwohl § 25 Abs. 2 Nr. 2 KrWG lediglich davon spricht, dass der Besitzer von Abfällen diese den verpflichteten Herstellern oder Vertreibern zu überlassen hat, dürften keine durchgreifenden Bedenken dagegen bestehen, eine solche Überlassungspflicht auch gegenüber einem Rücknahmesystem anzuordnen. Dies gilt jedenfalls dann, wenn ein solches Rücknahmesystem von Herstellern und Vertreibern errichtet wird, sodass das Rücknahmesystem im Auftrage dieser Hersteller und Vertreiber arbeitet.

Nach § 25 Abs. 2 Nr. 3 KrWG kann der Verordnungsgeber auch die Art und Weise der Überlassung, einschließlich der Maßnahmen zum Bereitstellen, Sammeln und Befördern sowie der Bringpflichten der unter § 25 Abs. 2 Nr. 2 KrWG genannten Abfallbesitzer festlegen. Die zuletzt genannte Bringpflicht macht nicht nur im Fall einer angeordneten Rückgabepflicht Sinn. Vielmehr kann eine solche Bringpflicht auch für den Fall, dass lediglich eine Rücknahmepflicht angenommen wird, sinnvoll sein, weil damit geklärt wird, dass der Rücknahmepflichtige die Abfälle nicht an einem bestimmten Punkt abzuholen hat, sondern dass er lediglich Rücknahmeeinrichtungen bereitstellen muss, an denen die Abfallbesitzer ihre Abfälle abgeben können.

Für den Fall, dass der Verordnungsgeber sich entscheiden würde, eine Rücknahmepflicht für die Hersteller und Vertreiber von WEA zur Sicherstellung einer hinreichenden Entsorgungsinfrastruktur für die faserhaltigen Abfälle einzuführen, wäre eine ergänzende Rückgabepflicht für die WEA-Betreiber sinnvoll, weil nur so die von den Herstellern und Vertreibern zu entsorgenden Abfallmengen hinreichend sicher prognostiziert und entsprechende Entsorgungsdienstleistungen von ihnen im Wettbewerb ausgeschrieben werden könnten.

7.8.5.3 Ergänzende Regelung zur Kostentragungspflicht

In einer Rechtsverordnung nach § 25 Abs. 1 KrWG kann zur Festlegung von Anforderungen nach § 23 KrWG sowie zur ergänzenden Festlegung von Pflichten der Erzeuger und Besitzer von Abfällen und der Entsorgungsträger im Rahmen der Kreislaufwirtschaft auch festgelegt werden, wer die Kosten für die Rücknahme, Verwertung und Beseitigung der zurückzunehmenden

Erzeugnisse zu tragen hat. Dazu kann vertreten werden, dass im Zweifel der Rücknahmeverpflichtete derjenige ist, der aufgrund seines Verursachungsbeitrags die Kosten für die Rücknahme, die Verwertung und Beseitigung zu übernehmen hat. Zutreffend dürfte sein, dass der Rücknahmepflichtige die Kosten für die Annahme der Abfälle sowie für deren Entsorgung zu tragen hat. Im Übrigen ermächtigt § 25 Abs. 2 Nr. 1 KrWG nur zur Regelung der Kosten der Rücknahme, nicht jedoch der Rückgabe. Soweit etwa der Rücknahmeort in der Verordnung an der Abgabestelle definiert wird, müssen die Kosten, die für eine Rückgabe an die Abgabestelle anfallen, von demjenigen getragen werden, der den Abfall an diesem Rückgabeort zurückgibt. Außerdem kann der Verordnungsgeber die Kosten für die Rücknahme, Verwertung und Beseitigung der zurückzunehmenden Erzeugnisse sowohl den Herstellern oder Vertreibern als aber auch den Abfallbesitzern und -erzeugern sowie den öffentlich-rechtlichen Entsorgungsträgern auferlegen. Eine Kostentragungspflicht des Abfallbesitzers würde wohl regelmäßig dessen Bereitschaft, die Abfälle zurückzugeben, verringern. Dies gilt jedenfalls solange, wie eine alternative Entsorgungsmöglichkeit kostengünstiger ist. Deshalb wird die Kostentragungspflicht für den Abfallbesitzer nur dann für sinnvoll gehalten, wenn dieser auch nach § 25 Abs. 2 Nr. 2 KrWG zur Rückgabe verpflichtet ist. Soweit Hersteller und Vertreiber die Kosten übernehmen, werden diese versuchen, diese Kosten über die Produktpreise auf den Verbraucher abzuwälzen. Ähnliches geschieht bei der Kostentragung durch ein Rücknahmesystem, soweit die Beteiligten an dem System die Kosten durch Lizenzentgelte, Beiträge oder andere Geldzahlungen übernehmen und sie dann ihrerseits wiederum in die Produktpreise einkalkulieren.

7.8.6 Zwischenergebnis zur Rücknahme- und Rückgabepflicht

Die Einführung einer Pflicht von Herstellern und Vertreibern zur Rücknahme von Rotorblattabfällen oder Teilfraktionen dieser Abfälle, wie etwa den faserhaltigen Abfällen, wäre weder mit dem Argument, eine solche Rücknahmepflicht könne Hersteller und Vertreiber veranlassen, ihre Rotorblätter entsorgungsfreundlicher herzustellen, noch mit dem Argument, den Betreibern von WEA könnten die Mittel fehlen, die ordnungsgemäße und schadlose Entsorgung der Rotorblätter zu finanzieren, zu empfehlen.

Eine Rücknahmepflicht wäre jedoch dann zu erwägen, wenn zu befürchten wäre, dass für die Entsorgung der prognostizierten Mengen von Rotorblattabfällen zukünftig auf dem Markt keine hinreichende Entsorgungsinfrastruktur sowohl hinsichtlich der Aufbereitung als auch hinsichtlich der Verwertung dieser Abfälle zukünftig zur Verfügung stehen wird oder die erforderlichen Anlagen regional so abweichend von dem regional sehr unterschiedlich hohen Abfallaufkommen verteilt sind, dass ein zu hoher Transportverkehr von den Standorten stillgelegter WEA zu den Aufbereitungs- und Verwertungsanlagen zu befürchten wäre.

Müsste ein Engpass schon bei den Aufbereitungsanlagen befürchtet werden, müsste sich die Rücknahmepflicht auf die noch nicht aufbereiteten Rotorblattabfälle erstrecken; fehlte es nur an geeigneten Verwertungs-, insbesondere Recycling-Anlagen, könnte die Rücknahmepflicht sich auf die nach einer Aufbereitung der Rotorblattabfälle verbleibenden und getrennt gehaltenen faserhaltigen Abfälle beschränken, soweit die ordnungsgemäße und schadlose Verwertung der übrigen Fraktionen, insbesondere des Altmetall und des Altholzes gesichert erscheint und soweit eine solche Aufbereitung verbindlich vorgeschrieben wird.

Die Rücknahmepflicht sollte mit einer Rückgabepflicht entweder der Betreiber der WEA oder der Betreiber der Aufbereitungsanlagen gegenüber den Herstellern und Vertreibern bzw.

gegenüber einem von ihnen eingerichteten Rücknahmesystem verknüpft werden. Nur bei einer Rückgabepflicht können die Rücknahmepflichtigen den von ihnen zu beauftragenden Entsorgungsunternehmen eine kalkulierbare Abfallmenge gewährleisten.

Vorzugswürdig wäre es bei Einführung einer Rücknahme- und Rückgabepflicht, die für die Entsorgung verantwortlichen Betreiber von WEA nicht aus ihrer Entsorgungsverantwortung zu entlassen, sondern sie zu verpflichten, ein angemessenes, vom Rücknahmepflichtigen zu bestimmendes, hinsichtlich der Angemessenheit jedoch gerichtlich überprüfbares Entgelt für die Entsorgung ihrer Rotorblattabfälle zu zahlen. Damit würde dem Verursacherprinzip und der Tatsache, dass die Anlagenbetreiber für die Entsorgung Sicherheiten gebildet haben, Rechnung getragen. Außerdem würde eine solche Entgeltpflichtigkeit dazu beitragen, eine Unverhältnismäßigkeit der Übertragung einer Entsorgungsverantwortung an die Hersteller und Vertreiber für in der Vergangenheit hergestellte Rotorblätter zu vermeiden.

7.9 Zusammenfassende rechtliche Empfehlungen zur Organisationsverantwortung

Empfehlungen zur Organisationsverantwortung und zu den rechtlichen Rahmenbedingungen für eine ordnungsgemäße, schadlose und hochwertige Verwertung der bei der Stilllegung von WEA anfallenden Rotorblattabfälle im Sinne der §§ 6-8 KrWG richten sich in erster Linie an die Bundesregierung, die vom Gesetzgeber verschiedentlich ermächtigt ist, durch den Erlass von Rechtsverordnungen die gesetzlichen Vorgaben zu ergänzen und zu konkretisieren. Ergänzend dazu kann eine behördliche Vollzugshilfe zur Demontage, Aufbereitung und Verwertung der Rotorblattabfälle dazu beitragen, die Rahmenbedingungen für ein erfolgreiches Recycling der Rotorblattabfälle zu verbessern.

Die Empfehlungen beziehen sich unter anderem auf

- eine Verbesserung der Informationslage für die entsorgungspflichtigen Anlagenbetreiber und die von ihnen beauftragten Entsorgungsunternehmen,
- die Konkretisierung materiell-rechtlicher Vorgaben für die Entsorgung von Rotorblattabfällen,
- eine Verbesserung der Entsorgungsüberwachung,
- die Einführung von Rücknahmepflichten für Hersteller und Vertreiber von WEA für den Fall, dass sich die für die ordnungsgemäße, schadlose und hochwertige Entsorgung der prognostizierten Rotorblattabfallmengen in den kommenden Jahren notwendige Entsorgungsinfrastruktur nicht rechtzeitig auf dem Markt eine hinreichende Entsorgungsinfrastruktur entwickelt.

7.9.1 Verbesserung der Informationslage für entsorgungspflichtige Anlagenbetreiber

Für das Recycling von Rotorblättern fehlen den für die Entsorgung verantwortlichen Anlagenbetreibern und den von ihnen zu beauftragenden Entsorgungsunternehmen entsorgungsrelevante Informationen, insbesondere zur Verwendung faserhaltiger Verbundwerkstoffe in den Rotorblättern. Der Verordnungsgeber sollte deshalb dafür sorgen, dass diese Informationen für die Entsorgung von Rotorblattabfällen zukünftig zuverlässig zur Verfügung stehen.

Die Informationsgrundlagen können verbessert werden durch

- eine Ergänzung von Pflichtangaben im Marktstammdatenregister,
- eine Kennzeichnung der Rotorblätter,
- und durch Informationspflichten der Hersteller und Vertreiber.

Betriebs- und Geschäftsgeheimnisse rechtfertigen grds. die Vorenthaltung der für die Entsorgung erforderlichen Informationen nicht. Zu einer Erweiterung der Pflichtangaben zu entsorgungsrelevanten Informationen im Marktstammdatenregister kann der Verordnungsgeber die Marktstammdatenregisterverordnung ändern. Kennzeichnungs- und Informationspflichten zu den für die Entsorgung von Rotorblattabfällen relevanten Informationen kann die Bundesregierung in einer Rechtsverordnung nach § 24 KrWG einführen.

Für das Marktstammdatenregister wird eine ergänzende Verpflichtung durch den Verordnungsgeber empfohlen zu folgenden Angaben:

- Rotorblattgewicht,
- Materialzusammensetzung,
- Konstruktion der Rotorblätter.

Eine Ergänzung der Pflichtangaben zum Marktstammdatenregister um Angaben zur Konstruktion und Materialzusammensetzung von Rotorblättern wäre vom Gesetzeszweck des EnWG und von der Verordnungsermächtigung des § 111e EnWG gedeckt.

Faserhaltige Rotorblätter sollten außerdem als solche gekennzeichnet werden, um ihre separate Entsorgung zu sichern. Der konkrete Inhalt der Kennzeichnung hängt davon ab, ob und ggfs. welche Informationspflichten zusätzlich für Hersteller und Vertreiber eingeführt werden.

Informationspflichten der Hersteller und Vertreiber könnten in der Form eines vom SRU empfohlenen „Kreislaufpasses“ bzw. eines von der EU-Kommission und der Bundesregierung angestrebten „Digitalen Produktpasses“ eingeführt werden, mit denen Informationen zu Inhaltsstoffen und zu Reparatur- und Recyclingverfahren dauerhaft und leicht zugänglich bereitgestellt werden sollen.

Der Kreislaufpass für WEA bzw. Rotorblätter könnte sich auf folgende Angaben erstrecken:

- Rotorblattgewicht, Rotorblattlänge, maximaler und minimaler Rotorblattumfang, Lage und Art der Befestigung am Rotor, Rotordurchmesser, Rotorgewicht, Lage des Schwerpunkts, Lage der Anschlagpunkte, Angabe des dicksten Querschnitts des Rotorblatts in „mm“.
- Hersteller der Anlage und Anlagentyp, Hersteller des Rotorblatts und -typ, sofern bezeichnet, Jahr der Herstellung, Blitzableiter ja/nein, Blattheizung ja/nein, Vorhandensein von Unwuchtschroten, Lage der Kammern, Material der Unwuchtschrote.
- CFK- und GfK-Kennzeichnung, Angaben zu verwendeten Fasern (Fasertyp), Lage, Art und Umfang von CFK-Gurten, Lage, Art und Umfang von hybriden Faserverbundstrukturen, Lage, Art, Umfang und Material von Wuchtgewichten.
- Möglichkeiten der Aufbereitung und der hochwertigen Verwertung der Rotorblattabfälle.

7.9.2 Konkretisierung materiell-rechtlicher Vorgaben für die Verwertung

Das KrWG enthält umfassende Anforderungen an eine ordnungsgemäße, schadlose und hochwertige Verwertung auch von Rotorblattabfällen (§§ 6-14, 15-16 KrWG). Hinzu kommen Verordnungen und einschlägige Bestimmungen des sonstigen Umweltrechts (z. B. BImSchG, WHG, BNatSchG, etc.).

Ergänzend dazu könnten einige untergesetzliche Regelungen zu Einbindung und Verbleib von Abfällen, die bei der Entsorgung der Rotorblätter anfallen, in Erzeugnissen nach Art, Beschaffenheit oder Inhaltsstoffen zu beschränken oder zu verbieten (§ 10 Abs. 1 Nr. 1 KrWG), sinnvoll sein. Dies könnten ferner z. B. Verordnungsbestimmungen sein, wonach

- CFK-haltige Abfälle nicht in Abfallverbrennungsanlagen eingesetzt und vorbehaltlich der Ergebnisse weiter Forschung nicht oder nur bei Beachtung bestimmter Maßgaben in Zementöfen energetisch verwerten werden dürfen,
- eine Verunreinigung anderer Abfallströme mit faserhaltigen Abfällen zu vermeiden ist,
- die Freisetzung von Titandioxid bei der Entsorgung von lackierten und beschichteten Rotorblättern vermieden werden muss.

Ergänzende Schadstoffgrenzwerte setzen eine fundierte Datenlage voraus. Dazu besteht Forschungsbedarf und darauf aufbauend ggfs. auch Regelungsbedarf, z. B. für lungengängige Carbonfaserfragmente mit WHO-Geometrie.

Soweit zur Festlegung solcher Grenzwerte weiterer Forschungsbedarf besteht, kann der dazu erforderliche Zeitraum dadurch überbrückt werden, dass der Verordnungsgeber vorsorglich verbindlich vorschreibt, in welcher Weise die Freisetzung lungengängiger Fasern in die Umwelt und am Arbeitsplatz zu verhindern ist.

7.9.3 Hochwertigkeit der Rotorblattentsorgung

Der Forschungsbericht, insbesondere die Kapitel 4 bis 6, liefern Erkenntnisse, welche Verfahrenstechniken für die Zerteilung der Rotorblätter vor Ort, für die Aufbereitung der zerteilten Rotorblätter durch Zerkleinerung, Klassierung und Separierung und für die anschließende Recycling Verwertung eingesetzt werden können. Außerdem beschreibt der Forschungsbericht in den genannten Kapiteln Vor- und Nachteile einzelner Verfahrenstechniken (z. B. Energiebedarf, Verschleiß, Wirtschaftlichkeit, etc.).

Die recherchierten Erkenntnisse führen jedoch nicht zu einer nach den Maßstäben des § 6 Abs. 2 S 2 KrWG erstellten, umfassenden Lebensbilanzzyklusanalyse im Sinne von § 8 Abs. 1 S. 3 KrWG. Deshalb wurden technische Verfahrensalternativen bei der vergleichenden Bewertung ausgeschieden, wenn es ihnen an einem hinreichenden technischen Reifegrad fehlt, nicht aber wegen einer Verfehlung der Anforderungen des § 8 Abs. 1 S. 3 KrWG.

7.9.4 Empfehlungen zur Entsorgungsüberwachung

Es wird befürchtet, dass Rotorblätter auf ungeeigneten Wegen entsorgt oder als wiederverwendbar dauerhaft zwischengelagert, zur „Scheinverwertung“ exportiert und im Ausland abgelagert werden. Deshalb sollten Möglichkeiten einer noch effektiveren Überwachung geprüft werden.

Bedarf für zusätzliche, gesonderte Genehmigungs- oder Anzeigepflichten für den Rückbau oder sogar speziell für die Verwertung der Rotorblattabfälle, ergibt sich aus dem Forschungsvorhaben jedoch nicht.

Auch eine Erstreckung von Nachweispflichten auf nicht gefährliche Rotorblattabfälle ist nicht erforderlich.

Betreiber von Demontage-, Aufbereitungs- und Verwertungsbetrieben, die Rotorblätter entsorgen, könnten aber ergänzend verpflichtet werden, Anforderungen zu erfüllen, die in einem untergesetzlichen Regelwerk geregelt werden. Solche Anforderungen können sich auf die Sach- und Fachkunde des Personals, auf die technische Ausstattung des Betriebs (z. B. Untergrundabdichtungen, Absaugeinrichtungen, etc.), auf Platzgrößen, Einfriedung, Eingangskontrolle, Dokumentation, etc. beziehen.

Sinnvoll ist eine ergänzende Zertifizierung von Entsorgungsfachbetrieben für die Entsorgung faserhaltiger Abfälle.

Die von der LAGA empfohlenen Abfallschlüssel für faserhaltige Abfälle können sinnvoll sein. Die (isolierte) Einführung gesonderter Abfallschlüssel für Rotorblattabfälle wird hingegen eher kritisch gesehen. Bei Einführung einer Kennzeichnung, die sich auf die Verwendung von CFK und GFK erstreckt, könnte eine gesonderte Schlüsselung jedenfalls für Rotorblattabfälle verzichtbar sein, weil mit der Kennzeichnung sichergestellt ist, dass die Aufbereitungs- und Entsorgungsbetriebe den Fasergehalt der Abfälle nicht übersehen können.

7.9.5 Einführung von Rücknahme- und Rückgabepflichten

Rücknahme- und Rückgabepflichten sind ein erheblicher Eingriff in Grundrechte von Herstellern, Vertreibern und Betreibern von WEA. Ihre Einführung muss verhältnismäßig, d. h. für einen bestimmten Zweck (umweltverträgliche und hochwertige Verwertung) geeignet, erforderlich und angemessen sein. Das gilt auch für die konkrete Ausgestaltung (z. B. Schnittstelle zwischen Betreiber- und Herstellerverantwortung, Kostenzurechnung). Rücknahme- und Rückgabepflichten beeinträchtigen zudem den Wettbewerb. Auch die Förderung der Windenergie sollte nicht ohne Not durch die Einführung von Rücknahme- und Rückgabepflichten behindert werden.

Die Befürchtung, Anlagenbetreiber könnten keine ausreichenden Sicherheiten für die Entsorgung der Rotorblattabfälle gestellt haben, rechtfertigt keine Einführung von Rücknahmepflichten für Hersteller/Vertreiber. Der Gefahr unzureichender Sicherheitsleistungen ist ggfs. durch Nachforderungen nach § 17 BImSchG zu begegnen.

Rücknahme- und Rückgabepflichten für Rotorblattabfälle sind nur erforderlich, wenn zu befürchten ist, dass zukünftig bundesweit oder regional nicht genügend Anlagen zur Entsorgung der prognostizierten Rotorblattabfallmengen zur Verfügung stehen. Diese Gefahr dürfte weniger für die Aufbereitung (Zerkleinerung, Klassierung und Sortierung von Rotorblattabfällen) und eher für die weitere Verwertung faserhaltiger Abfälle bestehen.

Rücknahmepflichten könnten ggfs. zeitlich und räumlich auch erst nach der Aufbereitung (Zerkleinerung, Klassierung und Sortierung) ansetzen, es sei denn es ist eine zu geringe Kapazität von geeigneten Aufbereitungsanlagen zu befürchten. Eine auf einzelne Fraktionen der

Rotorblätter nach Aufbereitung beschränkte Rücknahmepflicht würde allerdings eine saubere Trennung der Fraktionen voraussetzen.

Rücknahmepflichten können sich an Hersteller und Vertreiber von WEA und/oder von Rotorblättern richten. Rücknahme- und Rückgabepflichten könnten sich auch auf andere faserhaltige Abfälle erstrecken; zwingend ist das aus Gründen der Gleichbehandlung nicht.

Die Einführung von Rücknahme- und Rückgabepflichten für bereits in Verkehr gebrachte Rotorblätter ist grds. mit dem Rückwirkungsverbot vereinbar. Die für die Entsorgung der Rotorblätter verantwortlichen Anlagenbetreiber sollten aber nicht aus ihrer finanziellen, durch Sicherheitsleistungen abgesicherten Kostenverantwortung entlassen werden.

Rücknahmepflichten der Hersteller/Vertreiber sollten deshalb mit einer entgeltpflichtigen Rückgabepflicht der WEA-Betreiber verbunden werden.

7.9.6 Mögliche Gegenstände einer Vollzugshilfe

Die Stilllegung immissionsschutzrechtlich genehmigter WEA ist der Behörde nach § 15 Abs. 3 S. 1 BImSchG anzuzeigen. Die Behörde kann zur Sicherung einer umweltverträglichen Demontage (Bodenschutz, Gewässerschutz, Immissionsschutz, Naturschutz und die Kreislaufwirtschaft) nach § 17 Abs. 4 a S. 2 BImSchG erforderliche Anordnungen treffen. Eine untergesetzliche Regelung ist dazu grds. nicht erforderlich; hilfreich ist jedoch eine Vollzugshilfe zum Rückbau der WEA für die zuständige Behörde, die sich auch auf Empfehlungen zur Demontage der Rotorblätter erstreckt. Eine solche Vollzugshilfe kann von den gegenüber den Genehmigungs- und Überwachungsbehörden weisungsbefugten Länderbehörden verfasst werden. Das kann sich anbieten, wenn sie auf dem Wege eines Erlasses behördenintern verbindlich gemacht werden soll. Eine Vollzugshilfe kann dazu aber auch von den Bund-Länder-Arbeitsgemeinschaft Immissionsschutz und Abfall formuliert werden.

In einer Vollzugshilfe sollten Kriterien, die im Rahmen der Verkehrsanschauung für die Abfalleigenschaft von demontierten Rotorblättern sprechen, genannt und erläutert werden, um zu vermeiden, dass Rotorblätter zur Umgehung der gebotenen Entsorgung als „Schein-Ersatzteile“ gelagert oder exportiert werden.

Für das Ende der Abfalleigenschaft einzelner Fraktionen der Rotorblattabfälle sind unterschiedliche Regelwerke maßgeblich. Eine eigenständige Regelung zum Ende der Abfalleigenschaft von Rotorblattabfällen empfiehlt sich nicht. Für den Vollzug wäre eine zusammenfassende Erläuterung der Kriterien zur Bestimmung des Endes der Abfalleigenschaft im Rahmen einer Vollzugshilfe hilfreich.

In einer Vollzugshilfe sollte außerdem erläutert werden, welche Informationen Genehmigungs- und Aufsichtsbehörden mit Blick auf nach der Stilllegung der Anlage anfallende Rotorblattabfälle sie zur Entscheidung über den Genehmigungsantrag nach den §§ 20, 21 der 9. BImSchV benötigen und welche Anforderungen ergänzend dazu später an die immissionsschutzrechtliche Stilllegungsanzeige nach § 15 Abs. 3 BImSchG gestellt werden können.

Die Vollzugshilfe sollte anregen, dass die immissionsschutzrechtlich zuständige Behörde spätestens anlässlich der Stilllegungsanzeige dem Anlagenbetreiber ein konkretes Entsorgungskonzept für die Entsorgung der Anlage und insbesondere der Rotorblätter abzuverlangen.

Eine Vollzugshilfe könnte sich z. B. auch auf folgende Hinweise erstrecken:

- Vor der Erstbehandlung ist zu prüfen, ob eine Wiederverwendung von einem Rotorblatt oder einzelnen seiner Bauteile technisch möglich und wirtschaftlich zumutbar ist und insoweit ggfs. auch einer Vorbereitung zur Wiederverwendung zugeführt werden können,
- Rotorblätter sollen möglichst vor Ort zerkleinert werden, um Schwertransporte zu vermeiden, soweit sie nicht wiederverwendet oder zur Wiederverwendung vorbereitet werden,
- Bei der Zerkleinerung sind Staubemissionen zu vermeiden (z. B. durch Einhausung, Absaugung),
- Zur Transportoptimierung kann es sinnvoll sein, bereits am Standort der WEA einzelne Fraktionen voneinander zu trennen (z. B. CFK, GFK, Holz, Metall), wenn die Zusammensetzung des Rotorblatts hinreichend bekannt ist und die Trennung umweltverträglich vor Ort möglich ist.

7.9.7 Anforderungen an das Produktdesign

Eine Verpflichtung der WEA-Betreiber, nach Stilllegung der WEA die Rotorblätter weiterzuverwenden, käme nur in Betracht, wenn die Rotorblätter noch für einen weiteren Einsatz in einem relevanten Zeitraum tatsächlich verwendbar sind und wenn für in diesem Sinne gebrauchte Rotorblätter ein Markt vorhanden ist oder geschaffen werden kann. Das ist eine Frage des Einzelfalls; eine abstrakt/generelle Verpflichtung dazu empfiehlt sich nicht. Der Verordnungsgeber kann jedoch gem. § 24 Nr. 1 KrWG z. B. bestimmen, dass

- Rotorblätter nur so in den Verkehr gebracht werden dürfen, dass ihre mehrfache Verwendung erleichtert wird. Das kann z. B. die Zerlegbarkeit der Rotorblätter oder die saubere Trennbarkeit von faserhaltigen Teilen der Rotorblätter betreffen,
- bei Konstruktion und Produktion von Rotorblättern der Demontage, Wiederverwendung und Verwertung umfassend Rechnung zu tragen ist,
- die Verwendung bestimmter gefährlicher Stoffe so weit wie möglich zu vermeiden ist.

8 Zusammenfassung

In den nächsten beiden Jahrzehnten sind bezüglich des Rückbaus von Windenergieanlagen (WEA) jährlich etwa 30.000 t an Rotorblattabfällen zu erwarten. Diese Mengenabschätzung basiert auf einer WEA-Lebenszeit von 20 Jahren. Ende 2020 ist die 20-jährige EEG-Förderung für die ersten WEA ausgelaufen, was zum verstärkten Rückbau und somit zu größeren Mengen an Rotorblattabfällen führt. Eine Laufzeitverlängerung für WEA, über die 20-jährigen EEG-Förderung, wird aktuell diskutiert, was prognostizierte jährliche Abfallmengen beeinflussen kann.

8.1 Rotorblattkonstruktion und erwartete Abfallmengen

Im Wesentlichen besteht der Aufbau eines Rotorblatts aus zwei Halbschalen (Unter- und Oberschale), die bei der Herstellung in Sandwichbauweise an Vorder- und Hinterkante mittels Harzkleber miteinander verbunden werden. Bezüglich verschiedener Bereiche eines Rotorblatts wird zwischen dem Wurzelabschnitt und dem aerodynamischen Abschnitt unterschieden. Der Wurzelabschnitt ist der rohrförmige Teil des Rotorblatts, der mit der Turbine mit Metallelementen verbunden ist.

Als Kernwerkstoffe für die Konstruktion von Rotorblättern werden in den Unter- und Oberschalen meist Hartschäume (PVC, PMI, PET oder PUR) oder Balsaholz verbaut. Um die Biegekräfte innerhalb des Rotorblatts aufzunehmen, werden zwischen der Unter- und Oberschale entweder Holmstege oder eine Holmkonstruktion als Versteifungselemente eingesetzt. Die Stege oder Holme bestehen aus Faserverbundkunststoffen (FVK) in einer Sandwichbauweise mit einem Kern aus Balsaholz oder Schaum. Als Verstärkungsmaterialien können Glasfaser oder Carbonfaser verwendet werden.

Im Herstellungsprozess eines Rotorblatts wird das Versteifungselement zuerst mit der Unterschale verklebt. Anschließend wird die Oberschale auf die Stege oder Holme gesetzt und alle Komponenten erneut mit Harzkleber verbunden. Zum Einsatz kommen Epoxidkleber oder Kleber auf Polyurethan-Basis. Als Matrixharze werden duroplastische Kunststoffharze verwendet. Dabei wird zwischen ungesättigten Polyesterharzen (UP), Vinylesterharzen (VE) sowie Epoxidharzen (EP) unterschieden. Als Oberflächenschutz der Rotorblätter werden Gelcoats- und Lackmaterialien (Polyester, Epoxid Harz, Acrylate oder PUR) eingesetzt.

Bezüglich der Fertigungsverfahren der Rotorblätter werden in der Literatur vor allem das Vakuuminfusionsverfahren (VARTM), das Prepreg-Verfahren (mit vorimprägnierter Verstärkungsfaser) und das Integral-Blade-Verfahren beschrieben. Das Integral-Blade-Verfahren wurde von Siemens entwickelt und basiert auf dem VARTM-Verfahren. Die Hauptidee dieses Sonderverfahrens ist, das Rotorblatt als einzelnes Bauteil und nicht in Form von zwei verklebten Halbschalen herzustellen. Damit kann der Klebeprozess und somit die Klebeverbindungen zwischen Ober- und Unterschale als potentielle Schwachstellen der Rotorblätter vermieden werden.

Im Hinblick auf mögliche Schäden an Rotorblättern stellen Blitzeinschläge die häufigste Ursache dar. Als Blitzschutzsystem sind daher im Bereich der Rotorblattspitze ein oder mehrere eingeschraubte und somit leicht austauschbare Metallteile als sogenannte Rezeptoren angebracht. Als Blitzableiter wird ein dicker metallischer Draht verwendet, der im Innern des Rotorblatts zwischen den Rezeptoren und der Blattwurzel verläuft. Über die Blattwurzel ist der Blitzableiter mit dem Erdungssystem der Windenergieanlage verbunden. Eine weitere Ursache für Schäden an Rotorblättern ist die Erosion der Blattoberfläche durch den Aufprall von Sandkörnern und Regentropfen, welche vermehrt an der Vorderkante der Rotorblätter auftritt.

Aus diesem Grund ist vor allem die Wartung der Vorderkante des Rotorblatts unerlässlich, um die vorbestimmte Lebenserwartung der Blätter zu erreichen.

Um Schäden an Rotorblättern zerstörungsfrei zu detektieren, können Verfahren wie beispielsweise das Ultraschall-Echo-Verfahren, die lokale Resonanzspektroskopie, die Computer-Laminographie oder die Wärmefluss-Thermographie angewendet werden. Um Inspektionen während des Betriebs durchzuführen, ist außerdem der Einsatz unbemannter Monitoringsysteme möglich. Mithilfe dieser automatisierten ferngesteuerten Inspektionssysteme können Rotorblätter sowohl an on- als auch offshore-WEA zügig inspiziert werden.

Je nach Schadensfall werden unterschiedliche Reparaturen an den Rotorblättern durchgeführt: Für die Reparatur von und den Schutz vor Erosionsschäden werden in der Regel Beschichtungen, Bänder oder Schilde eingesetzt. Für die Reparatur nicht-struktureller Matrixrisse oder für kosmetische Reparaturen werden üblicherweise Füllungen und Abdichtungen verwendet. Harzinjektionen können für kleinere Oberflächenrisse oder kleine Delaminationen eingesetzt werden. Bei strukturellen Schäden kommen Plug/Patch- und Schalreparaturen zum Einsatz.

Das Aufkommen für Rotorblattabfälle aus onshore-Windenergieanlagen wird in den nächsten Jahren aufgrund der erwarteten Lebensdauern und der beobachteten Zubauraten in den 2000er Jahren ansteigen. Insbesondere ab 2030 kann mit erhöhten Abfallaufkommen von mehr als 15.000 Tonnen/Jahr gerechnet werden. Die Menge an zu erwartenden carbonfaserverstärkten Kunststoffen aus Rotorblättern ist hingegen gering und steigt erst ab 2030 auf mehr als 1000 Tonnen/Jahr.Der größte Teil der Rotorblattabfälle wird aus Glasfaserverstärkten Kunststoffen bestehen. Diese Abfälle betrugen jedoch im Jahr 2019 etwa nur ca. 3 % der jährlich in Europa produzierten Menge an GFK (AVK Composites-Marktbericht 2019 und Sommer et al. 2020); deutlich größere Mengen werden derzeit in der Bau- (34 %) und Transportindustrie (33 %) sowie in der Elektronikindustrie (15 %) eingesetzt.

Im zugrundeliegenden Materialstammdatenregister MaStR werden keine Materialinformationen geführt; lediglich das Datum der Inbetriebnahme, der Typ, der Hersteller, die installierte Leistung, die Nabenhöhe und der Rotordurchmesser lassen Rückschlüsse auf die Materialzusammensetzung zu. Teilweise erschweren Datenlücken die Auswertung.

In den Stadt- und Landkreisen Lichtenau (NRW), Bredstedt (Schleswig-Holstein), Rostock (Mecklenburg-Vorpommern), Jüterborg/Niedergörsdorf (Brandenburg) und Prenzlau/Uckerfelde (Brandenburg) werden die höchsten Materialaufkommen aus den bestehenden onshore-Windenergieanlagen bis 2040 erwartet. Insgesamt wird das mit Abstand größte Abfallaufkommen in Niedersachsen anfallen, gefolgt von Brandenburg, Nordrhein-Westfalen, Schleswig-Holstein, und Sachsen-Anhalt.

8.2 Risikobewertung der beim Rückbau und der Verwertung von Rotorblättern freiwerdenden Stäube und Fasern anhand von Gefährlichkeit und Exposition

Zusammenfassend lässt sich für die Betrachtung der potentiell freiwerdenden Stäube und Fasern Folgendes feststellen:

- Für Carbonfasern fehlen rechtlich bindende Grenzwerte für die Emission an Arbeitsplätzen oder in die Umwelt. Im Rahmen der BMBF-Projekte CarboBreak und CFC – CarbonFibreCycle wird bei entsprechender Bearbeitung von CF/CFK eine Freisetzung von Faserfragmenten mit WHO-Geometrie beobachtet. Die Veröffentlichungen zu ermittelten Konzentrationen an

WHO-Fasern an Arbeitsplätzen und in Abhängigkeit der Zerkleinerung von carbonfaserhaltigen Abfällen werden in 2022 erwartet.

- Im Rahmen der toxikologischen Tests des CFC – CarbonFibreCycle -Projekts werden in humanen Lungenzellen die CF mit WHO-Geometrie exponiert wurden, inflammatorische Wirkung sowie stressinduzierte Genregulierung beobachtet. Auch die Publikation dieser Daten ist für 2022 vorgesehen.
- Für viele Rotorblätter lässt sich mangels genauer Daten zu den verbauten Materialien keine abschließende Beurteilung verfassen. Konkretes Beispiel sind die Glasfasern, die je nach Art (z. B. E- und ECR-Glas, Faserdurchmesser) als kanzerogen eingestuft werden oder auch nicht. Nach dem Fürsorgeprinzip ist hier immer der gefährlichere Fall anzunehmen.
- Insbesondere für die Demontage-Prozesse am Standort der WEA fehlen Werte zur Freisetzung von inhalierbaren Stäuben und Fasern, gleiches gilt aber auch für die Zerkleinerung beim Aufbereiter.
- Für eine abschließende Beurteilung sind folgende Fragen forschungsseitig zu klären:
  - Welche Biopersistenz bzw. Löslichkeiten haben Carbonfasern in der Lunge? Welche gesundheitlichen Folgen können nach der Inhalation von CF mit WHO-Fasergeometrie auftreten?
  - Wie verhalten sich Faserfragmente in der Umwelt? Wie wirkt es sich auf die Umwelt (Boden, Wasser, Luft) aus, dass CF in der Umwelt inert sind? Kommt es zur Anreicherung in der Umwelt (Bioaakumulation) bzw. bestimmten Lebewesen (Biomagnifikation)? Wenn ja, mit welchen Folgen?
  - Welche Partikel- und Faserkonzentrationen werden bei den verschiedenen Bearbeitungsprozessen freigesetzt?
- Für die geforderten Messungen von freigesetzten Fasern an Arbeitsplätzen und in der Umwelt gilt, dass Faseranzahlkonzentrationen und nicht nur Massenkonzentrationen bestimmt werden sollten. Dafür bedarf es einer klaren Einstufung von Carbonfasern als Fasern bzw. Faserquelle. Mangels einer anderen Regelung wird hier noch häufig der massenbezogene Grenzwert für elementaren Kohlenstoff herangezogen, der aber im Falle einer kritischen Geometrie diese unberücksichtigt lässt.
- Da während der Aufklärung dieser offenen Fragen der Umgang mit CF/CFK u. a. beim Rückbau von Rotorblättern nicht eingestellt wird, sollten nach dem Fürsorgeprinzip folgende Maßnahmen ergriffen werden:
  - Keine Freisetzung von CF-haltigen Partikeln und Fasern in die Umwelt. Sowohl für Emissionen in die Luft, als auch Boden und Gewässer sind geeignete Schutzmaßnahmen zu treffen, also in erster Linie Rückhaltemaßnahmen durch Absaugungen und Auffangen von Abwässern.
  - Schutz der Arbeitnehmer durch Einhausung der Prozesse mit Absaugung und geeigneter Filterung im Abgas.
  - Sollte dennoch das Risiko einer Exposition der Arbeitenden bestehen, so sind diese mit persönlicher Schutzausrüstung, konkret einer Atemmaske mit mindestens der Filterklasse P2/FFP2 auszustatten.

8.3 Baustellenseitige Abfallbehandlung, Aufbereitung und Verwertung von Rotorblattabfällen

Die Demontage der Rotorblätter stellt den ersten Schritt für den Rückbau einer WEA dar. Mit Hilfe eines Krans, welcher auf einer eigens dafür geplanten Stellfläche aufgestellt wird, werden die Rotorblätter einzeln oder als Satz (3 Rotorblätter) abgenommen und auf dem Boden abgelegt.

Ziel der Zerlegung von Rotorblättern vor Ort an der Baustelle ist bei einem Rückbau der WEA in den meisten Fällen der günstige und schnelle Abtransport der Materialien für eine weitere Aufbereitung und anschließende Verwertung. Dabei können zur Zerlegung von faserverstärkten Kunststoffen unterschiedliche Technologien zum Einsatz kommen. Die meistbenutzten Technologien zum Zerlegen von Rotorblättern auf der Baustelle und gängige Demontagetechnologien in Deutschland sind die Seilsäge, das Wasserstrahlschneiden, mobile Sägen und hydraulische Scheren. Eine neue Technologie ist die unbemannte Demontagekammer, mit Hilfe derer das Rotorblatt in Segmenten direkt von der WEA abgetrennt wird. Die unbemannte, umseitig geschlossene Sägezelle dieses Systems wird vom Boden gesteuert. Auf diese Weise reduzieren sich die Unfallgefahr für das Rückbaupersonal und die Umweltbelastung durch Glasfaserrückstände drastisch. Die Technologie ist direkt einsatzbereit und es sind weder Kran noch zusätzliche Maßnahmen bezüglich des Bodenschutzes erforderlich. Durch die Arbeit am hängenden Blatt entfallen Platzanforderungen an die Umgebung. Außerdem ist der Rückbau dadurch sowohl onshore als auch offshore effizient möglich.

Ein vielversprechendes zukünftiges alternatives Demontageverfahren ist die energetische Demontage, bei der das Trennen der Rotorblätter mittels Sprengladungen (z. B. Schneidladungen) erfolgt. Das Verfahren wurde aus klassischen Abbruchverfahren adaptiert.

Die Materialzusammensetzung der Rotorblattabfälle, die aufbereitet und der Verwertung zugeführt werden, kann sich mit deren Entwicklungsstand ändern. So besitzen ältere Rotorblätter, die nun zur Verwertung anfallen, noch keine bzw. sehr geringe CFK-Anteile. CFK wird aktuell in Rotorblättern maßgeblich in Längsgurten verbaut und der Einsatz hybrider Faserverbundstrukturen nimmt zu.

Bisher gelten FVW als schwer recycelbar, wobei sich eine solche Aussage auf sortenreine Fraktionen bezieht. Für Rotorblattabfälle, bestehend aus dem komplexen Materialmix aus GFK, CFK, Metallen, Schäumen, Balsaholz, Lacke, Beschichtungen und Klebern ist eine hochwertige Verwertung aufwändiger und bedingt eine verwertungsspezifische Materialaufbereitung zur Gewinnung möglichst sortenreiner Fraktionen.

Die Bewertungskriterien der Aufbereitung zeigen, dass eine robuste Zerkleinerungstechnik notwendig ist, um eine mögliche Zerkleinerung von dicken Rotorblattquerschnitten und dem abrasiven Verhalten der FVK zu gewährleisten. Maschinen mit großer Materialaufgabe sind geeignet, um die zerlegten Rotorblattabschnitte zu zerkleinern. Als mögliche einstufige Maschinen können Querstromzerspaner, Hammerbrecher, die bei der Altautoaufbereitung zum Einsatz kommen, oder Schredder zur Vorzerkleinerung eingesetzt werden. Je nach Maschine, Einstellungsparameter und Größe des Gitterrostes sind unterschiedliche Produktgrößen möglich, die verwertungsspezifisch sind.

Der Querstromzerspaner schneidet bei den spezifischen Energieverbräuchen und den zu erwartenden Verschleiß und Instandhaltungsaufwand günstig ab. Zweckdienlich sind in der Regel maximal zwei Zerkleinerungsstufen, eine die mit einem langsamlaufenden Vorzerkleinerer (Schredder) geschieht sowie eine zweite schnelllaufende Zerkleinerungsmaschine (Hammermühle, QSZ), die den Rotorblattabfall auf die notwendige

Zielgröße zerkleinert. Weitere Zerkleinerungsstufen werden nur benötigt, wenn die weitere Zerkleinerung im Feinmahlbereich, zum Beispiel zur Füllstoffherstellung, erforderlich ist (Partikelrecycling).

Bei der Aufbereitung von Rotorblattabfällen werden zunächst Metalle, elektrische und elektronische Bestandteilen sowie CFK-Anteile möglichst sortenrein entfernt. Das Metallrecycling selbst ist seit langem etabliert und lediglich die sortenreine Abtrennung von den Rotoblattabfällen ist hier erforderlich, deren hochwertige Verwertung selbst ist gewährleistet.

Auch elektrische und elektronische Bestandteile können weitgehend sortenrein aus den Rotorblattabfällen entfernt und etablierten Verwertungsprozessen zugeführt werden.

Eine kritische Schadstoffentfrachtung ist bei eventuell noch vorkommenden verbauten Bleischroten durchzuführen.

CFK-Anteile in Längsgurten werden möglichst sauber aus der GFK-Struktur herausgetrennt, wobei ein GFK-Störstoffanteil von 5 bis 10% verbleibt, der die Qualtität von rCF beeinflussen kann. Für künftig anfallende hybride FVW-Komponenten befinden sich Verwertungsoptionen noch weitgehend im Entwicklungsstadium.

Eine sortenreine Aufbereitung einer GFK-Fraktion, ohne Schäume und Balsaholz, wird bisher kommerziell sehr eingeschränkt durchgeführt, da es kein geeignetes wirtschaftliches Recyclingverfahren für GFK gibt. Aktuell wird GFK von Rotorblattabfällen, gemeinsam mit Schäumen, Balsaholz sowie Lacken, Beschichtungen und Klebern mehrstufig mechanisch aufbereitet und im Zementwerk als Materialmix verwertet, wobei die Glasfasern rohstofflich und die restlichen Materialien energetisch genutzt werden.

Die Aufbereitung dieses Materialmixes für eine Verwertung im Zementwerk erfolgt aktuell in Deutschland in nur einer Aufbereitungsanlage, die eine ausreichende Kapazität für die prognostizierten Rotorblattabfälle besitzt. Die Anlagenkapazität einer solchen Aufbereitung kann erhöht werden, wobei die Aufbereitung zweistufig zunächst mittels Schredder und nachfolgend im Querstromzerspaner (QSZ) erfolgt. Im QSZ werden Spuckstoffe aus der Papierindustrie beigemischt, was aus sowohl betriebstechnischen (Staubbindung, Sicherheitsaspekte), als auch materialspezifischen Gründen (Heizwert, Transportfähigkeit) notwendig ist.

Begrenzend bezüglich dieser Verwertungsroute ist die maximal verwertbare GFK-Menge im Zementwerk, wo es aktuell nur eine Anlage in Deutschland gibt, die dies ermöglicht. Ein GFK-Einsatz im Zementwerk bedingt eine spezielle Zusammensetzung de Klinker-Rohstoffe, als auch eine spezielle Anlagentechnik zur Materialverwertung, die bezüglich diese Stoffstroms im Kalzinator erfolgt. Diese Randbedingungen sind in Deutschland nur im Zementwerk der Firma Holcim in Lägerdorf erfüllt, das maximal 40.000 t/a an GFK-Abfällen verwerten kann.

Die Verwertung von CFK-Gurten kann nach einer mechanischen Aufbereitung als eine Art Halbzeug erfolgen, wenn der Markt eine Nachfrage für solche Produkte erzeugen kann.

Allgemein werden sortenreine CF-/CFK-Produktionsabfälle mittels Pyrolyse zu rCF recycelt, wozu es in Deutschland eine Anlage mit einer Kapazität von aktuell 1.000 t/a gibt, die erweitert werden soll. Sollte der GFK-Störstoffanteil in aufbereiteten CFK-Gurte bezüglich der Qualität des rCF zu hoch sein, so wäre eine weitere mechanische Aufbereitung notwendig.

Die Recyclingfähigkeit von Schäumen hängt stark vom Schaummaterial ab und Verwertungsprozesse befinden sich im Entwicklungsstadium, wobei solche eine sortenreine Fraktion bedingen.

Zur Verwertung von Balsaholz ist eine spezifische Aufbereitung notwendig, wozu Aufbereitungstechniken anzupassen sind, die teils am Markt zur Verfügung stehen.

Bezüglich Lacken und Beschichtungen kann deren Verwertung durch Additive beeinflusst werden und hier sollte insbesondere auf Titandioxid geachtet werden.

Es gibt wenige technoökonomische Bewertungsansätze für Rotorblatt EoL-Optionen die sowohl Rezyklatqualitäten als auch prozessspezifische Kapazitäten und Verluste mitberücksichtigen. Die beiden vorgestellten Ansätze von Sommer et al. (2020) und Fonte et al. (2021) zählen dazu. Der Ansatz von Fonte et al. eignet sich besser für eine betriebswirtschaftliche Einschätzung und wurde deshalb für die Untersuchung der Rotorblatt EoL Optionen in diesem Bericht verwendet. Die Gesamtkosten ohne Vorkette (Demontagekosten, Kosten der Vorzerkleinern, Transportkosten) einer Verwertungsanlage mit einer Jahreskapazität von 6000t konnten für das mechanische Zerkleinern auf etwa 0,09€/kg verarbeiteten Rotorblattabfall sowie für die beiden thermochemischen Verfahren Pyrolyse und Wirbelschichtverfahren mit 0,287€/kg Rotorblattabfall bestimmt werden. Trotz geringerer Rezyklatqualitäten des rGF aus der mechanischen Zerkleinerung erzielt das Verfahren ein ökonomisches Potential von etwa 0,23€/kg rGF. Das ökonomische Potential von Wirbelschichtverfahren liegt etwa 0,21€/kg rGF und das höchste Potential erzielt die Pyrolyse mit bis zu 0,33€ /kg rGF. Durch Rückgewinnung und Vertrieb von Prozessabwäre und Pyrolyseöl könnte das ökonomische Potential der thermochemischen Verfahren weiter erhöht werden.

Hauptproblem sowohl bei der Technoökonomischen Analyse (TEA) als auch für Untersuchungen der Umweltauswirkungen stellt die spärliche Datenlage dar. Anhand der Literaturrecherche lässt sich festhalten, dass besonders große prozesstechnische Datenlücken bei noch nicht etablierten Aufbereitungs- und Verwertungsverfahren von Rotorblättern existieren. Um eine bessere Kostenindikation entlang der Vielzahl an theoretisch möglichen Recycling-Prozessketten zu erstellen, bedarf es der Bereitstellung und Erhebung zusätzlicher prozess- und produktionstechnischer Details von Pilotanlagen oder von ersten kommerziellen Anbietern. Dasselbe gilt für eine detaillierte Untersuchung zugehöriger Umweltauswirkungen mithilfe einer fundierten vollständigen Ökobilanzierung durch die Bereitstellung belastbarer Energie- und Stoffbilanzendaten aus praktischen Versuchen und Messungen.

8.4 Organisationsverantwortung

Empfehlungen zur Organisationsverantwortung und zu den rechtlichen Rahmenbedingungen für eine ordnungsgemäße, schadlose und hochwertige Verwertung der bei der Stilllegung von WEA anfallenden Rotorblattabfälle im Sinne der §§ 6-8 KrWG richten sich in erster Linie an die Bundesregierung, die vom Gesetzgeber verschiedentlich ermächtigt ist, durch den Erlass von Rechtsverordnungen die gesetzlichen Vorgaben zu ergänzen und zu konkretisieren. Ergänzend dazu kann eine behördliche Vollzugshilfe zur Demontage, Aufbereitung und Verwertung der Rotorblattabfälle dazu beitragen, die Rahmenbedingungen für ein erfolgreiches Recycling der Rotorblattabfälle zu verbessern.

Die Empfehlungen beziehen sich unter anderem auf

- eine Verbesserung der Informationslage für die entsorgungspflichtigen Anlagenbetreiber und die von ihnen beauftragten Entsorgungsunternehmen,
- die Konkretisierung materiell-rechtlicher Vorgaben für die Entsorgung von Rotorblattabfällen,
- eine Verbesserung der Entsorgungsüberwachung,

- die Einführung von Rücknahmepflichten für Hersteller und Vertreiber von WEA für den Fall, dass sich die für die ordnungsgemäße, schadlose und hochwertige Entsorgung der prognostizierten Rotorblattabfallmengen in den kommenden Jahren nicht rechtzeitig auf dem Markt eine hinreichende Entsorgungsinfrastruktur entwickelt.

8.4.1 Verbesserung der Informationslage für entsorgungspflichtige Anlagenbetreiber

Für das Recycling von Rotorblättern fehlen den für die Entsorgung verantwortlichen Anlagenbetreibern und den von ihnen zu beauftragenden Entsorgungsunternehmen entsorgungsrelevante Informationen, insbesondere zur Verwendung faserhaltiger Verbundwerkstoffe in den Rotorblättern. Der Verordnungsgeber sollte deshalb dafür sorgen, dass diese Informationen für die Entsorgung von Rotorblattabfällen zukünftig zuverlässig zur Verfügung stehen.

Die Informationsgrundlagen können verbessert werden durch

- eine Ergänzung von Pflichtangaben im Marktstammdatenregister,
- eine Kennzeichnung der Rotorblätter,
- und durch Informationspflichten der Hersteller und Vertreiber.

Betriebs- und Geschäftsgeheimnisse rechtfertigen grds. die Vorenthaltung der für die Entsorgung erforderlichen Informationen nicht. Zu einer Erweiterung der Pflichtangaben zu entsorgungsrelevanten Informationen im Marktstammdatenregister kann der Verordnungsgeber die Marktstammdatenregisterverordnung ändern. Kennzeichnungs- und Informationspflichten zu den für die Entsorgung von Rotorblattabfällen relevanten Informationen kann die Bundesregierung in einer Rechtsverordnung nach § 24 KrWG einführen.

Für das **Marktstammdatenregister** wird eine ergänzende Verpflichtung durch den Verordnungsgeber empfohlen zu folgenden Angaben:

- Rotorblattgewicht,
- Materialzusammensetzung,
- Konstruktion der Rotorblätter.

Eine Ergänzung der Pflichtangaben zum Marktstammdatenregister um Angaben zur Konstruktion und Materialzusammensetzung von Rotorblättern wäre vom Gesetzeszweck des EnWG und von der Verordnungsermächtigung des § 111e EnWG gedeckt.

Faserhaltige Rotorblätter sollten außerdem als solche gekennzeichnet werden, um ihre separate Entsorgung zu sichern. Der konkrete Inhalt der **Kennzeichnung** hängt davon ab, ob und ggfs. welche Informationspflichten zusätzlich für Hersteller und Vertreiber eingeführt werden.

Informationspflichten der Hersteller und Vertreiber könnten in der Form eines vom SRU empfohlenen „**Kreislaufpasses**“ eingeführt werden, mit denen Informationen zu Inhaltsstoffen und zu Reparatur- und Recyclingverfahren dauerhaft und leicht zugänglich bereitgestellt werden sollen.

Der Kreislaufpass für WEA bzw. Rotorblätter könnte sich auf folgende Angaben erstrecken:

- Rotorblattgewicht, Rotorblattlänge, maximaler und minimaler Rotorblattumfang, Lage und Art der Befestigung am Rotor, Rotordurchmesser, Rotorgewicht, Lage des Schwerpunkts, Lage der Anschlagpunkte, Angabe des dicksten Querschnitts des Rotorblatts in „mm“.

- Hersteller der Anlage und Anlagentyp, Hersteller des Rotorblatts und -typ, sofern bezeichnet, Jahr der Herstellung, Blitzableiter ja/nein, Blattheizung ja/nein, Vorhandensein von Unwuchtschroten, Lage der Kammern, Material der Unwuchtschrote.
- CFK- und GfK-Kennzeichnung, Angaben zu verwendeten Fasern (Fasertyp), Lage, Art und Umfang von CFK-Gurten, Lage, Art und Umfang von hybriden Faserverbundstrukturen, Lage, Art, Umfang und Material von Wuchtgewichten.
- Möglichkeiten der Aufbereitung und der hochwertigen Verwertung der Rotorblattabfälle.

8.4.2 Konkretisierung materiell-rechtlicher Vorgaben für die Verwertung

Das KrWG enthält umfassende Anforderungen an eine ordnungsgemäße, schadlose und hochwertige Verwertung auch von Rotorblattabfällen (§§ 6-14, 15-16 KrWG). Hinzu kommen Verordnungen und einschlägige Bestimmungen des sonstigen Umweltrechts (z. B. BImSchG, WHG, BNatSchG, etc.).

Ergänzend dazu könnten einige untergesetzliche Regelungen zu Einbindung und Verbleib von Abfällen, die bei der Entsorgung der Rotorblätter anfallen, in Erzeugnissen nach Art, Beschaffenheit oder Inhaltsstoffen zu beschränken oder zu verbieten (§ 10 Abs. 1 Nr. 1 KrWG), sinnvoll sein. Auch sinnvoll könnten z. B. Verordnungsbestimmungen sein, wonach

- CFK-haltige Abfälle nicht in Abfallverbrennungsanlagen eingesetzt und nicht in Zementöfen verwerten werden dürfen,
- eine Verunreinigung anderer Abfallströme mit faserhaltigen Abfällen zu vermeiden ist,
- die Freisetzung von Titandioxid bei der Entsorgung von lackierten und beschichteten Rotorblättern vermieden werden muss.

Ergänzende Schadstoffgrenzwerte setzen eine fundierte Datenlage voraus. Dazu besteht Forschungsbedarf und darauf aufbauend ggfs. auch Regelungsbedarf, z. B. für lungengängige Carbonfaserfragmente mit WHO-Geometrie.

Soweit zur Festlegung solcher Grenzwerte weiterer Forschungsbedarf besteht, kann der dazu erforderliche Zeitraum dadurch überbrückt werden, dass der Verordnungsgeber vorsorglich verbindlich vorschreibt, in welcher Weise die Freisetzung lungengängiger Fasern in die Umwelt und am Arbeitsplatz zu verhindern ist.

8.4.3 Hochwertigkeit der Rotorblattentsorgung

Der Forschungsbericht, insbesondere die Kapitel 4 bis 6, liefern Erkenntnisse, welche Verfahrenstechniken für die Zerteilung der Rotorblätter vor Ort, für die Aufbereitung der zerteilten Rotorblätter durch Zerkleinerung, Klassierung und Separierung und für das anschließende Recycling eingesetzt werden können. Außerdem beschreibt der Forschungsbericht in den genannten Kapiteln Vor- und Nachteile einzelner Verfahrenstechniken (z. B. Energiebedarf, Verschleiß, Wirtschaftlichkeit, etc.).

Die recherchierten Erkenntnisse führen jedoch nicht zu einer nach den Maßstäben des § 6 Abs. 2 S 2 KrWG erstellten, umfassenden Lebensbilanzzyklusanalyse im Sinne von § 8 Abs. 1 S. 3 KrWG. Deshalb wurden technische Verfahrensalternativen bei der vergleichenden Bewertung ausgeschieden, wenn es ihnen an einem hinreichenden technischen Reifegrad fehlt, nicht aber wegen einer Verfehlung der Anforderungen des § 8 Abs. 1 S. 3 KrWG.

8.4.4 Empfehlungen zur Entsorgungsüberwachung

Es wird befürchtet, dass Rotorblätter auf ungeeigneten Wegen entsorgt oder als wiederverwendbar dauerhaft zwischengelagert, zur „Scheinverwertung“ exportiert und im Ausland abgelagert werden. Deshalb sollten Möglichkeiten einer noch effektiveren Überwachung geprüft werden.

Bedarf für zusätzliche, gesonderte Genehmigungs- oder Anzeigepflichten für den Rückbau oder sogar speziell für die Verwertung der Rotorblattabfälle, ergibt sich aus dem Forschungsvorhaben jedoch nicht.

Auch eine Erstreckung von Nachweispflichten auf nicht gefährliche Rotorblattabfälle ist nicht erforderlich.

Betreiber von Demontage-, Aufbereitungs- und Verwertungsbetrieben, die Rotorblätter entsorgen, könnten aber ergänzend verpflichtet werden, Anforderungen zu erfüllen, die in einem untergesetzlichen Regelwerk geregelt werden. Solche Anforderungen können sich auf die **Sach- und Fachkunde** des Personals, auf die **technische Ausstattung** des Betriebs (z. B. Untergrundabdichtungen, Absaugeinrichtungen, etc.), auf Platzgrößen, Einfriedung, Eingangskontrolle, Dokumentation, etc. beziehen.

Sinnvoll ist eine **ergänzende Zertifizierung** von Entsorgungsfachbetrieben für die Entsorgung faserhaltiger Abfälle.

Die von der LAGA empfohlenen **Abfallschlüssel** für faserhaltige Abfälle können sinnvoll sein. Die (isolierte) Einführung gesonderter Abfallschlüssel für Rotorblattabfälle wird hingegen eher kritisch gesehen. Bei Einführung einer Kennzeichnung, die sich auf die Verwendung von CFK und GFK erstreckt, könnte eine gesonderte Schlüsselung jedenfalls für Rotorblattabfälle verzichtbar sein, weil mit der Kennzeichnung sichergestellt ist, dass die Aufbereitungs- und Entsorgungsbetriebe den Fasergehalt der Abfälle nicht übersehen können.

8.4.5 Einführung von Rücknahme- und Rückgabepflichten

Rücknahme- und Rückgabepflichten sind ein erheblicher Eingriff in Grundrechte von Herstellern, Vertreibern und Betreibern von WEA. Ihre Einführung muss verhältnismäßig, d. h. für einen bestimmten Zweck (umweltverträgliche und hochwertige Verwertung) geeignet, erforderlich und angemessen sein. Das gilt auch für die konkrete Ausgestaltung (z. B. Schnittstelle zwischen Betreiber- und Herstellerverantwortung, Kostenzurechnung). Rücknahme- und Rückgabepflichten beeinträchtigen zudem den Wettbewerb. Auch die Förderung der Windenergie sollte nicht ohne Not durch die Einführung von Rücknahme- und Rückgabepflichten behindert werden.

Die Befürchtung, Anlagenbetreiber könnten keine ausreichenden Sicherheiten für die Entsorgung der Rotorblattabfälle gestellt haben, rechtfertigt keine Einführung von Rücknahmepflichten für Hersteller/Vertreiber. Der Gefahr unzureichender Sicherheitsleistungen ist ggfs. durch Nachforderungen nach § 17 BImSchG zu begegnen.

Rücknahme- und Rückgabepflichten für Rotorblattabfälle sind nur erforderlich, wenn zu befürchten ist, dass zukünftig bundesweit oder regional nicht genügend Anlagen zur Entsorgung der prognostizierten Rotorblattabfallmengen zur Verfügung stehen. Diese Gefahr dürfte weniger für die Aufbereitung (Zerkleinerung, Klassierung und Sortierung von Rotorblattabfällen) und eher für die weitere Verwertung faserhaltiger Abfälle bestehen.

Rücknahmepflichten könnten ggfs. zeitlich und räumlich auch erst nach der Aufbereitung (Zerkleinerung, Klassierung und Sortierung) ansetzen, es sei denn es ist eine zu geringe

Kapazität von geeigneten Aufbereitungsanlagen zu befürchten. Eine auf einzelne Fraktionen der Rotorblätter nach Aufbereitung beschränkte Rücknahmepflicht würde allerdings eine saubere Trennung der Fraktionen voraussetzen.

Rücknahmepflichten können sich an Hersteller und Vertreiber von WEA und/oder von Rotorblättern richten. Rücknahme- und Rückgabepflichten könnten sich auch auf andere faserhaltige Abfälle erstrecken; zwingend ist das aus Gründen der Gleichbehandlung nicht.

Die Einführung von Rücknahme- und Rückgabepflichten für bereits in Verkehr gebrachte Rotorblätter ist grds. mit dem Rückwirkungsverbot vereinbar. Die für die Entsorgung der Rotorblätter verantwortlichen Anlagenbetreiber sollten aber nicht aus ihrer finanziellen, durch Sicherheitsleistungen abgesicherten Kostenverantwortung entlassen werden.

Rücknahmepflichten der Hersteller/Vertreiber sollten deshalb mit einer **entgeltpflichtigen Rückgabepflicht** der WEA-Betreiber verbunden werden.

8.4.6 Mögliche Gegenstände einer Vollzugshilfe

Die Stilllegung immissionsschutzrechtlich genehmigter WEA ist der Behörde nach § 15 Abs. 3 S. 1 BImSchG anzuzeigen. Die Behörde kann zur Sicherung einer umweltverträglichen Demontage (Bodenschutz, Gewässerschutz, Immissionsschutz, Naturschutz und die Kreislaufwirtschaft) nach § 17 Abs. 4 a S. 2 BImSchG erforderliche Anordnungen treffen. Eine untergesetzliche Regelung ist dazu grds. nicht erforderlich; hilfreich ist jedoch eine Vollzugshilfe zum Rückbau der WEA für die zuständige Behörde, die sich auch auf Empfehlungen zur Demontage der Rotorblätter erstreckt.

In einer Vollzugshilfe sollten Kriterien, die im Rahmen der Verkehrsanschauung für die **Abfalleigenschaft von demontierten Rotorblättern** sprechen, genannt und erläutert werden, um zu vermeiden, dass Rotorblätter zur Umgehung der gebotenen Entsorgung als „Schein-Ersatzteile“ gelagert oder exportiert werden.

Für das **Ende der Abfalleigenschaft** einzelner Fraktionen der Rotorblattabfälle sind unterschiedliche Regelwerke maßgeblich. Eine eigenständige Regelung zum Ende der Abfalleigenschaft von Rotorblattabfällen empfiehlt sich nicht. Für den Vollzug wäre eine zusammenfassende Erläuterung der Kriterien zur Bestimmung des Endes der Abfalleigenschaft im Rahmen einer Vollzugshilfe hilfreich.

In einer Vollzugshilfe sollte außerdem erläutert werden, welche **Informationen** Genehmigungs- und Aufsichtsbehörden mit Blick auf nach der Stilllegung der Anlage anfallende Rotorblattabfälle sie zur Entscheidung über den Genehmigungsantrag nach den §§ 20, 21 der 9. BImSchV benötigen und welche Anforderungen ergänzend dazu später an die immissionsschutzrechtliche Stilllegungsanzeige nach § 15 Abs. 3 BImSchG gestellt werden können.

Die Vollzugshilfe sollte anregen, dass die immissionsschutzrechtlich zuständige Behörde spätestens anlässlich der Stilllegungsanzeige dem Anlagenbetreiber ein konkretes **Entsorgungskonzept** für die Entsorgung der Anlage und insbesondere der Rotorblätter abzuverlangen. Eine Vollzugshilfe könnte sich z. B. auch auf folgende **Hinweise** erstrecken:

- Vor der Erstbehandlung ist zu prüfen, ob das Rotorblatt oder einzelne seiner Bauteile einer Vorbereitung zur Wiederverwendung zugeführt werden können,
- Rotorblätter sollen möglichst vor Ort zerkleinert werden, um Schwertransporte zu vermeiden, soweit sie nicht wiederverwendet oder zur Wiederverwendung vorbereitet werden,

- Bei der Zerkleinerung sind Staubemissionen zu vermeiden (z. B. durch Einhausung, Absaugung),
- Zur Transportoptimierung kann es sinnvoll sein, bereits am Standort der WEA einzelne Fraktionen voneinander zu trennen (z. B. CFK, GFK, Holz, Metall), wenn die Zusammensetzung des Rotorblatts hinreichend bekannt ist und die Trennung umweltverträglich vor Ort möglich ist.

8.4.7 Anforderungen an das Produktdesign

Eine Verpflichtung der WEA-Betreiber, nach Stilllegung der WEA die Rotorblätter weiterzuverwenden, käme nur in Betracht, wenn die Rotorblätter noch für einen weiteren Einsatz in einem relevanten Zeitraum tatsächlich verwendbar sind und wenn für in diesem Sinne gebrauchte Rotorblätter ein Markt vorhanden ist oder geschaffen werden kann. Das ist eine Frage des Einzelfalls; eine abstrakt/generelle Verpflichtung dazu empfiehlt sich nicht. Der Verordnungsgeber kann jedoch gem. § 24 Nr. 1 KrWG z. B. bestimmen, dass

- Rotorblätter nur so in den Verkehr gebracht werden dürfen, dass ihre mehrfache Verwendung erleichtert wird. Das kann z. B. die Zerlegbarkeit der Rotorblätter oder die saubere Trennbarkeit von faserhaltigen Teilen der Rotorblätter betreffen,
- bei Konstruktion und Produktion von Rotorblättern der Demontage, Wiederverwendung und Verwertung umfassend Rechnung zu tragen ist,
- die Verwendung bestimmter gefährlicher Stoffe so weit wie möglich zu vermeiden ist.

9 Literaturverzeichnis

Aarhus, Karl (2009): Blade root extender for a wind turbine. Angemeldet durch GAMESA INNOVATION & TECHNOLOGY, S.L. am 08.10.2009. Anmeldenr: 12/575,593. Veröffentlichungsnr: US 2010/0098552 A1 A 22 2010.

Aarnæs, Trygve Storm (2018): Removal of Aluminium Carbide from Liquid Aluminium. Masterarbeit. Norwegian University of Science and Technology (NTNU). Department of Materials Science and Engineering.

Achternbosch, M.; Bräutigam, K.-R. (2000): Herstellung von Zementklinker Verfahrensbeschreibung und Analyse zum Einsatz von Sekundärbrennstoffen. FZK (FZKA 6508), zuletzt geprüft am 21.10.2021.

Achternbosch, M.; Bräutigam, K.-R.; Kupsch, C.; Reßler, B.; Sardemann, G. (2003): Analyse der Umweltauswirkungen bei der Herstellung, dem Einsatz und der Entsorgung von CFK- bzw. Aluminiumrumpfkomponenten. Hg. v. Forschungszentrum Karlsruhe GmbH. Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse. Online verfügbar unter http://www.itas.kit.edu/pub/v/2003/acua03a.pdf, zuletzt geprüft am 01.12.2020.

Adamec, Thomas (2007): Process for the comminution of composite materials. Angemeldet durch ADAMEC THOMAS [DE] am 13.07.2007. Anmeldenr: EP20070786048 20070713. Veröffentlichungsnr: EP2089201 (A1). B29B17/00;B03B9/06;B29B17/02. Prioriätsdaten: WO2007EP06220 20070713;DE20061034692 20060727.

Adler, Sonja E.; Güttler, Barbara E.; Friedrich, Klaus (2021): Evaluation of Recycled Carbon Fibre/Epoxy Composites: Thermal Degradation Behaviour of Pyrolysed and Virgin Carbon Fibres Using Thermogravimetric Analysis. In: *Adv. Ind. Eng. Polym. Res.* DOI: 10.1016/j.aiepr.2021.03.003.

Aerones Inc. (Hg.) (2020): Repair process: Surface preparation (grinding/sanding). Website Aerones. Online verfügbar unter https://aerones.com/, zuletzt geprüft am 02.03.2021.

Agrawal, Archana; Sahu, K. K. (2010): Problems, prospects and current trends of copper recycling in India: An overview. In: *Resour. Conserv. Recycl.* 54 (7), S. 401–416. DOI: 10.1016/j.resconrec.2009.09.005.

AiF Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e. V. (2021): Stofflich-energetische Verwertung von carbonfaserhaltigen Abfällen in der Pyrometallurgie. Online verfügbar unter https://igf.aif.de/innovationsfoerderung/industrielle-gemeinschaftsforschung/igf-steckbrief.php?id=23975&suchtext=CF%20Pyro, zuletzt aktualisiert am 12.03.2021.

Åkesson, Dan; Foltynowicz, Zenon; Christéen, Jonas; Skrifvars, Mikael (2012): Microwave pyrolysis as a method of recycling glass fibre from used blades of wind turbines. In: *J. Reinf. Plast. Compos.* 31 (17), S. 1136–1142. DOI: 10.1177/0731684412453512.

Albers, H.; Greiner, S.; Seifert, S.; Kühne, U. (2009): Recycling of Wind Turbine Rotor Blades - Fact or Fiction? In: *DEWI MAGAZIN NO. 34*.

Albers, Henning; Germer, Frauke; Spuziak-Salzenberg, Detlef; Brinkmann, Tobias; Spring, Philippe; Stührmann, Torben (2021a): Recycle Wind-Konzept eines Verwertungsnetzwerks für langlebige komplexe Produkte unter Berücksichtigung von Betreiber- und Herstellerverantwortungen am Beispiel von Windenergieanlagen. In: *Müll und Abfall* 53. Jahrgang (08.21), S. 420–430.

Albers, Henning; Germer, Frauke; Spuzlak-Salzenberg, Detlef; Brinkmann, Tobias; Spring, Philippe; Stührmann, Torben (2021b): RecycleWind – Konzept eines Verwertungsnetzwerks für langlebige komplexe Produkte unter Berücksichtigung von Betreiberund Herstellerverantwortungen am Beispiel von Windenergieanlagen. RecycleWind – Concept of a Recycling network for long-life complex products in consideration of operator and producer responsibility using the example of wind turbines. In: *Müll und Abfall* (8), S. 420–430. DOI: 10.37307/j.1863-9763.2021.08.

Alpha Recyclage Composites (Hg.) (2015): Welcome to composites 2.0. Online verfügbar unter http://www.arcomposites.com/index.php?id=15, zuletzt geprüft am 06.10.2021.

DIN EN 13920-1:2003, April 2003: Aluminium und Aluminiumlegierungen - Schrott.

Alvarez Quintana, Alejandro (2017): Installation for recycling composite materials with carbon fibre and/or glass fibre reinforcement, and method for recycling in said installation. Angemeldet durch Reciclalia SL am 10.04.2017. Anmeldenr: 17720173. Veröffentlichungsnr: EP 3 444 091 B1.

AlzChem Group AG (Hg.) (2019): Umwelterklärung 2019. für die Standorte Trostberg, Schalchen, Hart und Waldkraiburg. Online verfügbar unter https://www.alzchem.com/sites/default/files/uploads/Downloads_Bro_Fly_Zert/Umwelt_Zertifikate/alzchem_zert_umwelterklaerung_2019.pdf, zuletzt geprüft am 23.03.2021.

Amaechi, Chiemela V.; Agbomerie, Charles O.; Orok, Etim Offiong; Ye, Jianqiao (2020): Economic Aspects of Fiber Reinforced Polymer Composite Recycling. In: Encyclopedia of Renewable and Sustainable Materials: Elsevier, 377???397.

Amirzadeh, B.; Louhghalam, A.; Raessi, M.; Tootkaboni, M. (2017): A computational framework for the analysis of rain-induced erosion in wind turbine blades, part I: Stochastic rain texture model and drop impact simulations. In: *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 163 (3), S. 33–43. DOI: 10.1016/j.jweia.2016.12.006.

Ananth, K. P.; Shum, J. (1976): Fine Shredding of Municipal Solid Waste. Springfield (Environmental Protection Technology, 600276208).

Anastassakis, Georgios N. (2007): Solid waste disposal and recycling. In: Myer Kutz (Hg.): Environmentally Conscious Materials and Chemicals Processing. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc, 307-355.

Andersen, Niklas; Eriksson, Ola; Hillman, Karl; Wallhagen, Marita (2016): Wind Turbines' End-of-Life: Quantification and Characterisation of Future Waste Materials on a National Level. In: *Energies* 9 (12), S. 999. DOI: 10.3390/en9120999.

Angerer, K. (2021): MAI ÖkoCaP - Fraunhofer IGCV. Wirtschaftliche, technische und ökobilanzielle Bewertung von recycelten Carbonfasern in industriellen Prozessen. Online verfügbar unter https://www.igcv.fraunhofer.de/de/forschung/referenzprojekte/oekocap.html, zuletzt geprüft am 21.12.2021.

Antrekowitsch, Helmut; Paulitsch, Helmut; Pirker, Armin (2013): Reststoffe aus der Aluminium-Sekundärindustrie. In: Karl J. Thomé-Kozmiensky (Hg.): Aschen, Schlacken, Stäube. Aus Abfallverbrennung und Metallurgie. Neuruppin: TK-Verlag, S. 615–638. Online verfügbar unter https://www.vivis.de/wp-content/uploads/ASS/2013_ASS_615_638_Antrekowitsch.pdf, zuletzt geprüft am 24.03.2021.

Arias, Franco (2016): Assessment of Present/Future Decommissioned Wind Blade Fiber-Reinforced Composite Material in the United States.

Arnold, Reinhild; Behrend, Ralf; Flößner, Tommy; Gilbert, Maria; Strauß, Janine; Thüm, Sophia: Mikrowellen für Hochtemperaturprozesse. TU Bergakademie Freiberg. Online verfügbar unter https://tu-freiberg.de/sites/default/files/media/professur-fuer-gas--und-waermetechnische-anlagen-15258/05_vortrag_behrend.pdf, zuletzt geprüft am 07.02.2022.

Arnone, Mario (2018): Arbeitsbedingte Exposition gegenüber der einatembaren und der alveolengängigen Staubfraktion – Vorabveröffentlichung der MEGA-Auswertungen. Hg. v. Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e.V. (DGUV). Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA). Berlin.

Asbach, Christof; Hellack, Bryan; John, Astrid; Kamiski, Heinz; Kreckel, Sabine; Kuhlbusch, Thomas et al. (2018): Verbundprojekt: nanoGRAVUR - Nanostrukturierte Materialien - Gruppierung hinsichtlich Arbeits-, Verbraucher- und Umweltschutz und Risikominimierung. Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben. Institut für Energie- und Umwelttechnik e.V. (IUTA). Duisburg. Online verfügbar unter https://doi.org/10.2314/KXP:1667740156, zuletzt geprüft am 19.10.2020.

NIOSH Manual of Analytical Methods (NMAM) 7400, 15.08.1994: Asbestos and other Fibers by PCM. Online verfügbar unter https://www.cdc.gov/niosh/docs/2003-154/pdfs/7400.pdf, zuletzt geprüft am 18.01.2019.

Ashby, M.; Coulter, P.; Ball, N.; Bream, C. (2009): The CES EduPack Eco Audit Tool. A White Paper.

Ataya, Sabbah; Ahmed, Mohamed M.Z. (2013): Damages of wind turbine blade trailing edge: Forms, location, and root causes. In: *Engineering Failure Analysis* 35 (10), S. 480–488. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2013.05.011.

Ausschuss für Gefahrstoffe (Hg.) (2019): Informationen des Ausschusses für Gefahrstoffe (AGS) zur Absenkung der Akzeptanzkonzentration gemäß TRGS 910 im Jahr 2018. Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA). Berlin, zuletzt geprüft am 03.12.2020.

Austinat, Dirk; Malischewski, Mathias (2012): Vacuum infusion method for producing a wind turbine concept. Angemeldet durch NORDEX ENERGY GMBH [DE] am 20.04.2012. Anmeldenr: EP20120002800 20120420. Veröffentlichungsnr: EP2653296 (A1). B29C70/44;B29C70/54;B29D99/00;B29L31/08. Prioriätsdaten: EP20120002800 20120420.

AVK - Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe e. V. (AVK) (Hg.) (2013): Handbuch Faserverbundkunststoffe/Composites. Grundlagen · Verarbeitung · Anwendungen. 4. Aufl. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, zuletzt geprüft am 08.12.2020.

Bäger, D.; Simonow, B.; Kehren, D.; Dziurowitz, N.; Wenzlaff, D.; Thim, C. et al. (2019): Pechbasierte Carbonfasern als Quelle alveolengängiger Fasern bei mechanischer Bearbeitung von carbonfaserverstärkten Kunststoffen (CFK). In: *Gefahrst. - Reinhalt. Luft* (1/2), S. 13–16.

Barnes, Frazer (2016): Recycled Carbon Fibre as an Enabler for Cost Effective Lightweight Structures. Global Automotive Lightweight Materials. Detroit, 2016.

Barnes, Frazer (2021): Economic and Environmental Assessment of Recycled Carbon Fibre. 4. Fachtagung Composite Recycling & LCA. Composites United e.V. Online-Konferenz, 25.02.2021.

Baron, Paul A. (2016): Measurement of Fibers. NIOSH Manual of Analytical Methods (NMAM). 5th Edition. Hg. v. National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH) (NIOSH Manual of Analytical Methods (NMAM)), zuletzt geprüft am 24.01.2019.

Baron, Paul A.; Willeke, Klaus (2001): Aerosol Measurement - Principles, Techniques and Applications. 2nd. New York: John Wiley and Sons.

BASF (Hg.) (2016): Kantenschutz für Rotorblätter von BASF besteht 50-stündige Regenprüfung mit Bravour. Online verfügbar unter https://www.basf.com/global/de/media/news-releases/2016/06/p-16-230.html, zuletzt geprüft am 20.10.2021.

BASF Coatings GmbH (2015): Technisches Merkblatt RELEST® Wind LEP ETU Cartridge. Online verfügbar unter www.relest.de, zuletzt geprüft am 20.10.2021.

BAuA (2015): Nationales Asbest-Profil Deutschlands. Dortmund, Berlin, Dresden: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin.

Bauer, Alexandra (2012): Mikrowellenerwärmungstechnik: Potentiale und Grenzen. D_019-027_Linn.qxp:Layout 1 (cfi/Ber. DKG 89 (2012) No. 11-12), D19-D27. Online verfügbar unter https://www.linn-high-therm.de/fileadmin/user_upload/pages/about_us/download/publications/microwave_heating/Mikrowellenerwaermungstechnik_Potentiale_und_Grenzen.pdf, zuletzt geprüft am 12.10.2021.

Baumann, Leonhard; Möller, Roland; Holzrichter, Klaus; Salzinger, Josef (2007): Verwendung von Rest- und/oder Abfallstoffen in Elektroniederschachtöfen. Angemeldet durch AlzChem Trostberg GmbH am 16.05.2007. Anmeldenr: 07725317. Veröffentlichungsnr: EP 2 021 715 B1.

BayWa r.e. (Hg.) (2020): Vermarktung gebrauchter Windenergieanlagen und Ersatzteile. Online verfügbar unter https://www.baywa-re.de/de/wind/weitere-themen/gebrauchte-anlagen/#unsere-leistungen.

Becht, Jasmin; Lukas, Patricia (2018): Rückbauverpflichtung von WEA: Grenzen der Verhältnismäßigkeit. In: *Verwaltungsrundschau* 64 (1), S. 11–18.

Beckers, Thorsten; Ott, Ralf; Hoffrichter, Albert (2017): Die staatliche Entscheidung für den Ausbau von Windenergie an Land und Optionen ihrer Umsetzung. Eine Analyse auf Basis institutionenökonomischer Erkenntnisse. In: *ZUR* 28 (12).

Beckmann, Martin (1995): Rechtsprobleme der Rücknahme- und Rückgabepflichten. In: *DVBl - Deutsches Verwaltungsblatt*, S. 313–322.

Beckmann, Martin (2010): Abfallhierarchie und gesetzliche Überlassungspflichten im Arbeitsentwurf des Kreislaufwirtschaftsgesetzes. In: *AbfallR* 9 (2), S. 54–63.

Beckmann, Martin (2014): Abfallbezogene Nebenbestimmungen und nachträgliche Anordnungen bei immissionsschutzrechtlich genehmigungsbedürftigen Anlagen. In: *I+E*.

Beckmann, Martin (2021): Kommentierungen zum KrWG. In: Martin Beckmann, Wolfgang Durner, Thomas Mann und Marc Röckinghausen: Umweltrecht. Kommentar. München: C.H. Beck.

Behrend, Ralf (2019): PyReCa - Vollständiges stoffliches Recycling von CFK. TU Bergakademie Freiberg. Online verfügbar unter https://tu-freiberg.de/fakult4/iwtt/gwa/forschung/aktuelle-projekte, zuletzt geprüft am 07.02.2022.

Bellamy, Andrew (2014): Why looking after blades will pay for itself. In: *Windpower Monthly*. Online verfügbar unter https://www.windpowermonthly.com/article/1323558/why-looking-blades-will-pay-itself, zuletzt geprüft am 05.03.2021.

Bendel, Urs; Eyb, Enno (2011): Rotor blade for a wind turbine, wind turbine and method for manufacturing a rotor blade. Angemeldet durch REPOWER SYSTEMS AG [DE] am 27.01.2011. Anmeldenr: EP20110152375 20110127. Veröffentlichungsnr: EP2363599 (A2). F03D1/06. Prioriätsdaten: DE20101002432 20100226.

Bennet, Lorna (2021): Sustainable Decommissioning: Wind Turbine Blade Recycling. Report from Phase 1 of the Energy Transitition Alliance Blade Recycling Project. Offshore Renewable Energy (ORE) Catapult Ltd. Online verfügbar unter https://ore.catapult.org.uk/wp-content/uploads/2021/03/CORE_Full_Blade_Report_web.pdf, zuletzt geprüft am 27.08.2021.

Berkhout, Volker; Faulstich, Stefan; Görg, Philip; Kühn, Paul; Linke, Katrin; Lyding, Philipp et al.: Windenergie Report Deutschland 2012. Fraunhofer Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik (IWES). Stuttgart (Windenergie Report Deutschland). Online verfügbar unter https://publica.fraunhofer.de/entities/publication/4af80a50-6bd2-420e-880f-23996f9ef516/details.

Berkmüller, Ruth; Hartleitner, Bernhard; Tronecker, Dieter; Kreibe, Siegfried; Förster, Andreas; Gottlieb, Anita (2015): MAI Recycling - Entwicklung ressourceneffizienter CFK-Recyclingverfahren und Prozessketten für die künftige Bereitstellung qualitativ hochwertiger rC-Halbzeuge : Schlussbericht MAI Recycling : Berichtszeitraum. 01.07.2012-30.06.2015.

Bledzki, Andrzej K. (1997): Recycling von polymeren Verbundwerkstoffen.

Bledzki, Andrzej K.; Goracy, Krzysztof (1993): The use of recycled fibre composites as reinforcement for thermosets. In: *Mech. Compos. Mater.* 29 (4), S. 473–477.

Bledzki, Andrzej K.; Seidlitz, Holger; Goracy, Krzysztof; Urbaniak, Magdalena; Rösch, Janina J. (2021): Recycling of Carbon Fiber Reinforced Composite Polymers-Review-Part 1: Volume of Production, Recycling Technologies, Legislative Aspects. In: *Polymers* 13 (2). DOI: 10.3390/polym13020300.

Boin, Udo; Linsmeyer, Thomas; Neubacher, Franz; Winter, Brigitte (2000): Stand der Technik in der Sekundäraluminiumerzeugung im Hinblick auf die IPPC-Richtlinie. Wien: Umweltbundesamt (Monographien / Umweltbundesamt, 120).

Bonnet, Laurent (2011): Noise reducer for rotor blade in wind turbine. Angemeldet durch BONNET LAURENT [DE]; GEN ELECTRIC [US] am 31.05.2011. Anmeldenr: US201113149513 20110531. Veröffentlichungsnr: US2012027590 (A1). F03D1/06. Prioriätsdaten: US201113149513 20110531.

Börner, Rolf; Meiller, Martin; Oischinger, Jürgen; Daschner, Robert (2016): Untersuchung möglicher Umweltauswirkungen bei der Entsorgung nanomaterialhaltiger Abfälle in Abfallbehandlungsanlagen, zuletzt geprüft am 21.10.2021.

Bovet, Jana; Dross, Miriam; Kindler, Lars (2020): Bundesweite Flächenvorgabe für den Ausbau von Windenergie an Land. Eine erste Systematisierung und Einschätzung der Ausgestaltungsmöglichkeiten aus rechtlicher Sicht. In: *NVwZ* 39 (11), S. 754–759.

Brereton, George; Emanuel, Ronald M.; Lomax, Robert; Pennington, Keith; Ryan, Tyler; Tebbe, Heiko et al. (2010): Polyurethanes. In: Ullmann's encyclopedia of industrial chemistry. 7. edition, release 2015. Weinheim, Wiley online library: Wiley-VCH, S. 1–76.

Brinktrine, Ralf (2019): Kommentierung zu § 24 KrWG. In: Arndt Schmehl und Jan Henrik Klement: GK-KrWG. Gemeinschaftskommentar zum Kreislaufwirtschaftsgesetz. Hürth: Carl Heymanns.

Broadbent, Clare (2016): Steel's recyclability: demonstrating the benefits of recycling steel to achieve a circular economy. In: *Int. J. Life Cycle Assess.* 21 (11), S. 1658–1665. DOI: 10.1007/s11367-016-1081-1.

Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) (Hg.) (2019): Entsorgung faserhaltiger Abfälle. Abschlussbericht. Online verfügbar unter https://www.laga-online.de/documents/bericht-laga-ausschuss-entsorgung-faserhaltige-abfaelle_juli-2019_1574075541.pdf, zuletzt geprüft am 31.08.2020.

Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA): Ermitteln und Beurteilen der Gefährdungen bei Tätigkeiten mit Gefahrstoffen: Inhalative Exposition. TRGS 402. Fundstelle: GMBl 2010 S. 231-253 [Nr. 12]. Online verfügbar unter https://www.baua.de/DE/Angebote/Rechtstexte-und-Technische-Regeln/Regelwerk/TRGS/pdf/TRGS-402.pdf?__blob=publicationFile&v=4, zuletzt geprüft am 19.02.2021.

Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA) (Mai 2002): Faserstäube. TRGS 521, vom 2002, zuletzt geprüft am 19.02.2021.

Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA) (Januar 2006): Arbeitsplatzgrenzwerte. TRGS 900. Fundstelle: BArBl Heft 1/2006 S. 41 - 55 (900). Online verfügbar unter https://www.baua.de/DE/Angebote/Rechtstexte-und-Technische-Regeln/Regelwerk/TRGS/pdf/TRGS-900.pdf?__blob=publicationFile&v=10, zuletzt geprüft am 19.02.2021.

Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA) (Februar 2008): Abbruch-, Sanierungs- und Instandhaltungsarbeiten mit alter Mineralwolle. TRGS 521. Online verfügbar unter https://www.baua.de/DE/Angebote/Rechtstexte-und-Technische-Regeln/Regelwerk/TRGS/pdf/TRGS-521.pdf?__blob=publicationFile, zuletzt geprüft am 19.02.2021.

Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA) (02.04.2014): Risikobezogenes Maßnahmenkonzept für Tätigkeiten mit krebserzeugenden Gefahrstoffen. TRGS 910. Fundstelle: GMBl 2014 S. 258-270 [Nr. 12] (910). Online verfügbar unter https://www.baua.de/DE/Angebote/Rechtstexte-und-Technische-Regeln/Regelwerk/TRGS/pdf/TRGS-910.pdf?__blob=publicationFile&v=10, zuletzt geprüft am 19.02.2021.

Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA) (03.05.2016): Verzeichnis krebserzeugender, keimzellmutagener oder reproduktionstoxischer Stoffe. TRGS 905. Fundstelle: GMBl 2016 S. 378-390 [Nr. 19] (905). Online verfügbar unter https://www.baua.de/DE/Angebote/Rechtstexte-und-Technische-Regeln/Regelwerk/TRGS/pdf/TRGS-905.pdf?__blob=publicationFile&v=8, zuletzt geprüft am 19.02.2021.

Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA) (13.12.2019): Schutzmaßnahmen. TRGS 500. Fundstelle: GMBl 2019 S. 1330-1366 [Nr. 66/67] (500). Online verfügbar unter https://www.baua.de/DE/Angebote/Rechtstexte-und-Technische-Regeln/Regelwerk/TRGS/pdf/TRGS-500.pdf?__blob=publicationFile&v=2, zuletzt geprüft am 19.02.2021.

Bundesministerium der Justiz (BMJ): Gesetz über das Inverkehrbringen, die Rücknahme und die umweltverträgliche Entsorgung von Elektro- und Elektronikgeräten. ElektroG, vom 20.10.2015.

Bundesministerium der Justiz (BMJ); Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK): Gesetz über die Haftung für fehlerhafte Produkte. ProdHaftG, vom 15.12.1989.

Bundesministerium des Innern und für Heimat (BMI) (25.05.1976): Verwaltungsverfahrensgesetz. VwVfG, vom 25.06.2021. Online verfügbar unter https://www.gesetze-im-internet.de/vwvfg/VwVfG.pdf.

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMUV): Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Schutz gegen Baulärm Geräuschimmissionen. AVV Baulärm, vom 19.08.1970.

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMUV): Verordnung über die Bewirtschaftung von gewerblichen Siedlungsabfällen und von bestimmten Bau- und Abbruchabfällen. GewAbfV, vom 18.04.2017.

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMUV) (16.09.1980): Gesetz zum Schutz vor gefährlichen Stoffen. ChemG, vom 28.08.2013.

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMUV) (24.07.2002): Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft, TA Luft. Fundstelle: GMBl 2002 Nr. 25-29 S. 511. In: Gemeinsames Ministeralblatt. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1/dokumente/taluft_stand_200207241.pdf, zuletzt geprüft am 03.01.2021.

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMUV) (27.04.2009): Verordnung über Deponien und Langzeitlager. DepV, vom 30.06.2020. Online verfügbar unter https://www.gesetze-im-internet.de/depv_2009/DepV.pdf, zuletzt geprüft am 20.07.2022.

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMUV) (02.05.2013): Vierte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes. 4. BImSchV, vom 12.01.2021. Online verfügbar unter https://www.gesetze-im-internet.de/bimschv_4_2013/4._BImSchV.pdf.

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMUV) (15.08.2020): Verordnung über Anforderungen an die Verwertung und Beseitigung von Altholz. AltholzV.

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) (21.07.2014): Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien. EEG, vom 23.05.2022. Online verfügbar unter https://www.gesetze-im-internet.de/eeg_2014/, zuletzt geprüft am 20.07.2022.

Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB) (23.06.1960): Baugesetzbuch. BauGB, vom 26.04.2022. Online verfügbar unter https://www.gesetze-im-internet.de/bbaug/BauGB.pdf.

Bundesregierung (BReg): Verordnung über Anforderungen an den Einbau von mineralischen Ersatzbaustoffen in technischen Bauwerken. ErsatzbaustoffV, vom 09.07.2021.

Bundesregierung (BReg) (26.11.2010): Verordnung zum Schutz vor Gefahrstoffen, GefStoffV. In: Bundesgesetzblatt, zuletzt geprüft am 08.02.2022.

Bundesregierung (BReg); Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMUV): Gesetz zum Schutz von Geschäftsgeheimnissen. GeschGehG, vom 18.04.2019.

Bundesregierung (BReg); Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMUV) (1993): Drucksache 12/5672. Entwurf eines Gesetzes zur Vermeidung von Rückständen, Verwertung von Sekundärrohstoffen und Entsorgung von Abfällen.

Burchardt, Claus; Hurup, Allan; Norlem, Michael; Olesen, Brendt; Stiesdal, Henrik (2008): Mould and method for vacuum assisted resin transfer moulding. Angemeldet durch SIEMENS AG [DE] am 03.04.2008. Anmeldenr: EP20080006813 20080403. Veröffentlichungsnr: EP2106900 (A1). B29C70/44;B29C33/00;B29C45/27;B29C70/48;B29C70/54;B29D99/00. Prioriätsdaten: EP20080006813 20080403.

Bureau of International Recycling (2016): Global Non-Ferrous Scrap Flows. with a focus in Aluminium and Copper. Online verfügbar unter https://bir.org/publications/facts-figures/item/global-non-ferrous-scrap-flows-2000-2015, zuletzt geprüft am 30.12.20.

Bureau of International Recycling (Hg.) (2020): World Steel Recycling in figures. Steel Scrap - a Raw Material for Steelmaking. 11. Aufl. Online verfügbar unter https://www.bir.org/publications/facts-figures/download/643/175/36?method=view, zuletzt geprüft am 21.01.21.

Caduff, Marloes; Huijbregts, Mark A. J.; Althaus, Hans-Joerg; Koehler, Annette; Hellweg, Stefanie (2012): Wind power electricity: the bigger the turbine, the greener the electricity? In: *Environmental science & technology* 46 (9), S. 4725–4733. DOI: 10.1021/es204108n.

Candelieri, Tommaso; Coriano Orazio, Antonio; Cornacchia, Giacinto; Galvagno, Sergio; Lucchesi, Aldo; Portofino, Sabrina (2003): Method and Apparatus for recovering carbon and/or glass fibers from a composite material. Angemeldet durch Candelieri, Tommaso; Coriano Orazio, Antonio; Cornacchia, Giacinto; Enea Ente Nuove Tec; Galvagno, Sergio; Karborek SRL; Lucchesi, Aldo; Portofino, Sabrina am 17.04.2003. Anmeldenr: 0300247. Veröffentlichungsnr: WO002003089212A1.

Capuzzi, Stefano; Timelli, Giulio (2018): Preparation and Melting of Scrap in Aluminum Recycling: A Review. In: *Metals* 8 (4), S. 249. DOI: 10.3390/met8040249.

Carberry, William (2008): Airplane Recycling Efforts: Benefit Boeing Operators. In: *AERO* (QTR_04).

Carbon Conversions (Hg.) (2010): Recycling Trek Bike Frames. Case Study. Online verfügbar unter https://carbonconversions.com/recycling-trek-bike-frames/, zuletzt geprüft am 06.10.2021.

carboNXT GmbH (Hg.): Produkte. Online verfügbar unter https://www.carbonxt.de/de/produkte/, zuletzt geprüft am 21.12.2021.

Catack-H (Hg.) (2019): The future in carbon fibre recycling. Online verfügbar unter http://catack-h.com/technology/?lang=de, zuletzt geprüft am 21.02.2022.

Chou, Jui-Sheng; Chiu, Chien-Kuo; Huang, I-Kui; Chi, Kai-Ning (2013): Failure analysis of wind turbine blade under critical wind loads. In: *Eng. Fail. Anal.* 27, S. 99–118. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2012.08.002.

Christeen, Jonas (2012a): FINAL Report Covering the project activities from 01/01/2009 to 30/06/2012. Stena Metall AB. Schweden, Polen (LIFE07 ENV/S/000904). Online verfügbar unter https://webgate.ec.europa.eu/life/publicWebsite/index.cfm?fuseaction=search.dspPage&n_proj_id=3308, zuletzt geprüft am 03.05.2021.

Christeen, Jonas (2012b): FINAL Report Covering the project activities from 01/01/2009 to 30/06/2012. Stena Metall AB. Schweden, Polen (LIFE07 ENV/S/000904). Online verfügbar unter https://webgate.ec.europa.eu/life/publicWebsite/index.cfm?fuseaction=search.dspPage&n_proj_id=3308.

CHZ Technologies (Hg.) (2021a): Our Technology. Online verfügbar unter http://chztechnologies.com/technology, zuletzt geprüft am 18.10.2021.

CHZ Technologies (2021b): Thermolyzer TM - The Future of De-carbonization in Waste-to-Energy Technology. CHZ Technologies. Online verfügbar unter http://chztechnologies.com/technology, zuletzt geprüft am 07.02.2022.

Ciang, Chia Chen; Lee, Jung-Ryul; Bang, Hyung-Joon (2008): Structural health monitoring for a wind turbine system: a review of damage detection methods. In: *Meas. Sci. Technol.* 19 (12), S. 122001. DOI: 10.1088/0957-0233/19/12/122001.

Conrad Electronic SE: CONRAD 5 Min.-Epoxy (Harz).

Conversio (2019): Kurzfassung Conversio Studie - Titandioxid in Kunststoffen, zuletzt geprüft am 21.10.2021.

Cooperman, Aubryn; Eberle, Annika; Lantz, Eric (2021): Wind turbine blade material in the United States: Quantities, costs, and end-of-life options. In: *Resour. Conserv. Recycl.* 168, S. 105439. DOI: 10.1016/j.resconrec.2021.105439.

Corradini, R.; Hutter, C.; Köhler, D. (1999): GaBiE - Ganzheitliche Bilanzierung von Grundstoffen und Halbzeugen. Hg. v. Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V. München. Online verfügbar unter https://www.ffe.de/download/langberichte/FfE_GaBiE_Bilanzierung_Halbzeugen_Grundstoffen.pdf, zuletzt geprüft am 02.09.2021.

Cosson, Rainer (2019): Kommentierung zu § 5 KrWG. In: Ludger Giesberts und Michael Reinhardt: Umweltrecht. BImSchG, KrWG, BBodSchG, WHG, BNatSchG. München: C.H. Beck.

Coughlin, Daniel; Ludwig, Charles; Ozcan, Soydan; Hartman, Dave; Ginder, Ryan (2021): Controlled Pyrolysis: A Robust Scalable Composite Recycling Technology.

Cousins, Dylan S.; Suzuki, Yasuhito; Murray, Robynne E.; Samaniuk, Joseph R.; Stebner, Aaron P. (2019): Recycling glass fiber thermoplastic composites from wind turbine blades. In: *J. Clean Prod.* 209, S. 1252–1263. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.10.286.

Cripps, D. (2019): Glass-Fibre. Hg. v. NetComposites. Online verfügbar unter https://netcomposites.com/guide/reinforcements/glass-fibre/.

Cunliffe, Adrian M.; Jones, Nicola; Williams, Paul T. (2003): Recycling of fibre-reinforced polymeric waste by pyrolysis: thermo-gravimetric and bench-scale investigations. In: *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 70 (2), S. 315–338. DOI: 10.1016/S0165-2370(02)00161-4.

Cuoghi, Joe; Gregory, Karl; Townsend, Robert (2013): Methid of de-icing a wind turbine blade. Angemeldet durch VESTAS WIND SYS AS [DK] am 09.01.2013. Anmeldenr: WO2013DK50005 20130109. Veröffentlichungsnr: WO2013107457 (A1). F03D11/00. Prioriätsdaten: DK2012PA70035 20120120;DK2012PA70254 20120516;US201261649335P 20120520.

Daehn, Katrin E.; Cabrera Serrenho, André; Allwood, Julian M. (2017): How Will Copper Contamination Constrain Future Global Steel Recycling? In: *Environ. Sci. Technol.* 51 (11), S. 6599–6606. DOI: 10.1021/acs.est.7b00997.

Daniliuk, Vladislav; Xu, Yuanming; Liu, Ruobing; He, Tianpeng; Wang, Xi (2020): Ultrasonic de-icing of wind turbine blades: Performance comparison of perspective transducers. In: *Renew. Energy* 145 (1), S. 2005–2018. DOI: 10.1016/j.renene.2019.07.102.

Das, Subodh K.; Green, John A.S.; Kaufman, Gilbert J.; Emadi, Daryoush; Mahfoud, Musbah (2010): Aluminum Recycling - An Integrated, Industrywide Approach. In: *J. Miner. Metals Mater. Soc.* 62 (2), S. 23–26. DOI: 10.1007/s11837-010-0026-6.

Dashtkar, Arash; Hadavinia, Homayoun; Sahinkaya, M. Necip; Williams, Neil A.; Vahid, Samireh; Ismail, Fanya; Turner, Matthew (2019): Rain erosion-resistant coatings for wind turbine blades: A review. In: *Polymers and Polymer Composites* 27 (8), S. 443–475. DOI: 10.1177/0967391119848232.

David, Elena; Kopac, Janez (2015): Use of Separation and Impurity Removal Methods to Improve Aluminium Waste Recycling Process. In: *Mater. Today: Proc.* 2 (10), S. 5071–5079. DOI: 10.1016/j.matpr.2015.10.098.

Davidson, John; Price, Roy (2009a): Recycling Carbon Fibre. Angemeldet durch Recycled Carbon Fibre Limited am 19.01.2009. Anmeldenr: 09701931. Veröffentlichungsnr: EP000002152487B1.

Davidson, John; Price, Roy (2009b): Wiederverwendbare Kohlenstofffaser. Angemeldet durch RECYCLED CARBON FIBRE LTD [GB] am 19.01.2009. Anmeldenr: EP20090701931 20090119. Veröffentlichungsnr: EP2152487 (B1). B29B17/02;C10B53/07;F27B9/04;F27B9/40. Prioriätsdaten: WO2009EP50564 20090119;GB20080000940 20080118;US20080021953P 20080118.

Davidson, Kate; Heinz, Vera (2021): ELG Carbon Fibre becomes Gen 2 Carbon. Customer continuity secured and an exciting growth platform created. Gen 2 Carbon; ELG Haniel GmbH. Online verfügbar unter https://www.gen2carbon.com/ELG-Carbon-Fibre-becomes-Gen-2-Carbon.pdf, zuletzt aktualisiert am 10.05.2021, zuletzt geprüft am 22.07.2021.

DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V. (Hg.) (2020): Methodische Untersuchungen von Verfahrensoptionen zur thermischen Entsorgung carbonfaserverstärkter Kunststoffe. 21176 BG. Online verfügbar unter https://dechema.de/Forschungsf%C3%B6rderung/AiF/Forschungsprojekte/Laufende+Projekte/21176+BG.html, zuletzt geprüft am 12.03.2021.

Deeney, Peter; Nagle, Angela J.; Gough, Fergal; Lemmertz, Heloisa; Delaney, Emma L.; McKinley, Jennifer M. et al. (2021): End-of-Life alternatives for wind turbine blades: Sustainability Indices based on the UN sustainable development goals. In: *Resour. Conserv. Recycl.* 171, S. 105642. DOI: 10.1016/j.resconrec.2021.105642.

DEHN Deutschland (Hg.) (2020): Windzonen nach Postleitzahl. Online verfügbar unter https://www.dehn.de/de/windzone#windzone-plz, zuletzt aktualisiert am 14.07.2022.000Z, zuletzt geprüft am 14.07.2022.491Z.

Delfs, Sören (2019): Kommentierung zu § 3 KrWG. In: Arndt Schmehl und Jan Henrik Klement: GK-KrWG. Gemeinschaftskommentar zum Kreislaufwirtschaftsgesetz. Hürth: Carl Heymanns.

Derosa, R.; Telfeyan, E.; Mayes, J. S. (2005): Current State of Recycling Sheet Molding Compounds and Related Materials. In: *J. Thermoplast. Compos. Mater.* 18 (3), S. 219–240. DOI: 10.1177/0892705705045006.

DIN 38412-3, Oktober 2010: Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung, zuletzt geprüft am 26.10.2021.

Deutsche Emissionshandelsstelle im Umweltbundesamt (Hg.) (2021): Treibhausgasemissionen 2020. Emissionshandelspflichtige stationäre Anlagen und Luftverkehr in Deutschland (VET-Bericht 2020). Online verfügbar unter https://www.dehst.de/SharedDocs/downloads/DE/publikationen/VET-Bericht-2020.pdf?__blob=publicationFile&v=2, zuletzt geprüft am 31.08.2021.

Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (DGUV) (2014): Bearbeitung von CFK Materialien - Orientierungshilfe für Schutzmaßnahmen. Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (DGUV) (DGUV-Information, FB HM-074).

Deutsche WindGuard GmbH (Hg.) (2021): Windenergie-Statistik: Jahr 2020. Online verfügbar unter https://www.windguard.de/jahr-2020.html, zuletzt geprüft am 18.07.2022.

Deutsches Institut für Bautechnik (Hg.) (2015): Richtlinie für Windenergieanlagen. Einwirkungen und Standsicherheitsnachweise für Turm und Gründung. Online verfügbar unter https://www.dibt.de/fileadmin/dibt-website/Dokumente/Referat/I8/Windenergieanlagen_Richtlinie_korrigiert.pdf, zuletzt geprüft am 15.02.2022.

Deutsches Kupferinstitut (Hg.): Recycling von Kupferwerkstoffen. Düsseldorf. Online verfügbar unter http://copperalliance.de/uploads/2018/06/recycling-von-kupferwerkstoffen-final-pdf.pdf, zuletzt geprüft am 09.02.2021.

Deutsches Lackinstitut (Hg.) (2021): Langfristiger Schutz für Windenergieanlagen. Online verfügbar unter https://www.lacke-und-farben.de/magazin/wissenschaft-technik/langfristiger-schutz-fuer-windenergieanlagen/, zuletzt geprüft am 20.10.2021.

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR), Institut für Faserverbundleichtbau; Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik (Hg.) (2017): Innovationsbericht 2017. Unter Mitarbeit von Martin Wiedemann, Jana Hoidis, Peter Wierach, Christin Herrmann und Jörg Melcher. Braunschweig. Online verfügbar unter https://www.dlr.de/fa/Portaldata/17/Resources/dokumente/publikationen/innovationsberichte/DLR_FA_Innoberichtericht_2017.pdf, zuletzt geprüft am 14.07.2022.

Dewan, M. A.; Rhamdhani, M. A.; Mitchell, Jason B.; Davidson, C. J.; Brooks, G. A.; Easton, Mark; Grandfield, John F. (2011): Control and Removal of Impurities from Al Melts: A Review. In: *Mater. Sci. Forum* 693, S. 149–160. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.693.149.

Dieckmann, Martin; Hurst, Manuela (2014): Kommentierung zu § 22 KrWG. In: Hans D. Jarass und Frank Petersen: Kreislaufwirtschaftsgesetz. KrWG. München: C.H. Beck.

Dieterle, Michael (2016): Ökoeffizienz-Analyse zur Bewertung unterschiedlicher CFK-Recyclingtechnologien. Masterarbeit. Hochschule Pforzheim, Pforzheim.

Dietlein, Johannes (2014): Kommentierung zu § 5 BImSchG: Landmann / Rohmer. Umweltrecht: UmweltR. Loseblatt-Kommentar zum Umweltrecht. München: C.H. Beck.

Dietlein, Johannes (2019): Kommentierung zur 9. BImSchV: Landmann / Rohmer. Umweltrecht: UmweltR. Loseblatt-Kommentar zum Umweltrecht. München: C.H. Beck.

Dippel, Martin; Ottensmeier, Kriemhild (2018): Der Abfallbegriff in der Abgrenzung zum Nebenprodukt (§ 4 KrWG) und zum Ende der Abfalleigenschaft (§ 5 KrWG). Eine praxisbezogene Betrachtung. In: *AbfallR*.

Dix, Robert (2020): Repowering-Projekte vor dem Aus? Bauplanungsrechtliche Rahmenbedingungen der Windenergienutzung am Beispiel sog. Repowering-Vorhaben. In: *NVwZ* 39 (4).

DLR - Zentrum für Leichtbauproduktionstechnologie (2021): CosiMo – Composites for Sustainable Mobility (Verbundwerkstoffe für nachhaltige Mobilität). Online verfügbar unter https://www.dlr.de/zlp/de/desktopdefault.aspx/tabid-15691/25406_read-63232/, zuletzt geprüft am 21.10.2021.

Donaldson, Ken (2009): The inhalation toxicology of p -aramid fibrils. In: *Crit. Rev. Toxicol.* 39 (6), S. 540. DOI: 10.1080/10408440903083066.

Doppstadt Umwelttechnik GmbH (2020): DER CERON TYPE 308 BEZWINGT AUCH HOCHLEISTUNGSWERKSTOFFE. Online verfügbar unter https://www.doppstadt.de/news/detail/der-ceron-type-308-bezwingt-auch-hochleistungswerkstoffe/, zuletzt geprüft am 01.11.2021.

Dorigato, Andrea (2021): Recycling of thermosetting composites for wind blade application. In: *Adv. Ind. Eng. Polym. Res.* 4 (2), S. 116–132. DOI: 10.1016/j.aiepr.2021.02.002.

Dorworth, Louis (2013): Repairs for Advanced Composite Structures. Composites: Lightweighting the cars of tomorrow. Abaris Training Resources, Inc., 11.09.2013.

Du, Ying; Zhou, Shengxi; Jing, Xingjian; Peng, Yeping; Wu, Hongkun; Kwok, Ngaiming (2020): Damage detection techniques for wind turbine blades: A review. In: *Mechanical Systems and Signal Processing* 141 (2), S. 106445. DOI: 10.1016/j.ymssp.2019.106445.

Duflou, Joost R.; Tekkaya, A. Erman; Haase, Matthias; Welo, Torgeir; Vanmeensel, Kim; Kellens, Karel et al. (2015): Environmental assessment of solid state recycling routes for aluminium alloys: Can solid state processes significantly reduce the environmental impact of aluminium recycling? In: *CIRP Ann. - Manuf. Technol.* 64 (1), S. 37–40. DOI: 10.1016/j.cirp.2015.04.051.

Ebert, Rico; Krampitz, Thomas; Lieberwirth, Holger (2015): Grundlagenuntersuchungen zur Zerkleinerung nicht-spröder Leichtbauwerkstoffe mittels Scher-Reißbeanspruchung. In: Karl J. Thomé-Kozmiensky und Daniel Goldmann (Hg.): Recycling und Rohstoffe, Bd. 8. Neuruppin: TK-Verl. (8), S. 564–575.

Echidna (2021): Diamond & tungsten-carbide tipped rocksaws. Saws for construction, stone cutting, demolition and forestry. Online verfügbar unter https://www.arvi-demolitiontools.com/fileadmin/bestanden/brochures/Echidna_brochure_with_specifications.pdf.

Eder, M. A.; Bitsche, R. D.; Belloni, F. (2015): Effects of geometric non-linearity on energy release rates in a realistic wind turbine blade cross section. In: *Compos. Struct.* 132 (10), S. 1075–1084. DOI: 10.1016/j.compstruct.2015.06.050.

Eenews (2019): Deutschland: 2021 fallen erste Windkraftanlagen aus dem EEG - Branche entwickelt Recycling-Standards (ee-news.ch). Online verfügbar unter https://www.ee-news.ch/de/wind/article/41380/deutschland-2021-fallen-erste-windkraftanlagen-aus-dem-eeg-branche-entwickelt-recycling-standards, zuletzt aktualisiert am 14.07.2022.000Z, zuletzt geprüft am 14.07.2022.474Z.

Ekvall, Tomas (Hg.) (2020): Sustainability Assessment at the 21st century. Attributional and Consequential Life Cycle Assessment. Unter Mitarbeit von María José Bastante-Ceca: IntechOpen. Online verfügbar unter https://www.intechopen.com/chapters/69212.

Elhadi Ibrahim, Mohamed; Medraj, Mamoun (2019): Water Droplet Erosion of Wind Turbine Blades: Mechanics, Testing, Modeling and Future Perspectives. In: *Materials* 13 (1). DOI: 10.3390/ma13010157.

Ely, George Ray; Roach, Dennis P.; Rice, Thomas M.; Paquette, Joshua (2018): Critical Cost-Effective Wind Blade Inspections Using Autonomous Inspection Systems. Sandia Wind Blade Workshop. Lubbock, USA, 27.08.2018. Online verfügbar unter https://www.osti.gov/biblio/1582289, journal =.

VDI-Richtlinie 3469, September 2016: Emissionsminderung Herstellung und Verarbeitung von faserhaltigen Materialien Faserförmige Stäube Grundlagen, Überblick.

Emmerich, Rudolf; Kuppinger, Jan (2014): Kohlenstofffasern wiedergewinnen. Welches ist der richtige Weg für das Recycling von CFK? 201502-Kohlenstofffasern-wiedergewinnen-Kunststoffe.de. In: *Kunststoffe*.

EnergieKontor: Rotor blade extension. Source Internet. Online verfügbar unter https://www.rotorbladeextension.com/downloads/rbe_ek_presentation_english_june_2020.pdf, zuletzt geprüft am 05.03.2021.

EnergieKontor: Rotor Blade Extension (RBE). Online verfügbar unter https://www.rotorbladeextension.com/downloads/rbe_ek_presentation_english_june_2020.pdf, zuletzt geprüft am 05.03.2021.

EPRI (2018): Wind Turbine Blade Recycling: Preliminary Assessment. Electric Power Research Institute (3002017711). Online verfügbar unter https://www.epri.com/research/products/000000003002017711.

EuCIA (2013): Composites Recycling Made Easy. Hg. v. EuCIA. EuCIA. Online verfügbar unter https://eucia.eu/about-composites/sustainability, zuletzt geprüft am 24.05.2021.

Europäische Kommission (27.06.1967): Richtlinie 67/548/EWG des Europäischen Rates vom 27. Juni 1967 zur Angleichung der Rechts- und Verwaltungsvorschriften für die Einstufung, Verpackung und Kennzeichnung gefährlicher Stoffe. EU-Richtlinie 67/548/EWG, zuletzt geprüft am 08.02.2022.

Europäische Kommission (03.09.1996): Richtlinie 96/56/EG des europäischen Parlaments und des Rates vom 3. September 1996 zur Änderung der Richtlinie 67/548/EWG zur Angleichung der Rechts- und Verwaltungsvorschriften für die Einstufung, Verpackung und Kennzeichnung gefährlicher Stoffe. EU-Richtlinie 96/56/EG. Fundstelle: Abl. L 236 S. 35 (L 236), S. 35, zuletzt geprüft am 19.02.2021.

Europäische Kommission (05.12.1997): Richtlinie 97/69/EG der Komission zur dreiundzwanzigsten Anpassung der Richtlinie 67/548/EWG des Rates zur Angleichung der Rechts- und Verwaltungsvorschriften für die Einstufung, Verpackung und Kennzeichnung gefährlicher Stoffe an den technischen Fortschritt. EU-Richtlinie 97/69/EG. Fundstelle: Abl. L 343 S. 19 (L 343), 19-24, zuletzt geprüft am 28.01.2021.

Europäische Kommission (31.05.1999): Richtlinie 1999/45/EG des Europäischen Rates vom 31. Mai 1999 zur Angleichung der Rechts- und Verwaltungsvorschriften der Mitgliedstaaten für die Einstufung, Verpackung und Kennzeichnung gefährlicher Zubereitungen. Richtlinie 1999/45/EG, zuletzt geprüft am 08.02.2022.

Europäische Kommission (30.05.2008): Verordnung zur Festlegung von Prüfmethoden gemäß der Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 des Europäischen Parlaments und des Rates zur Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung chemischer Stoffe (REACH), EU-Verordnung (EG) Nr. 1907/2006. Fundstelle: Abl. L 142 S. 1. In: Amtsblatt der Europäischen Union. Online verfügbar unter https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32008R0440&qid=1591275521843&from=DE, zuletzt geprüft am 19.02.2021.

Europäische Kommission (16.12.2008): Verordnung (EG) Nr. 1272/2008 des europäischen Parlamentes und des Rates über die Einstufung, Kennzeichnung und Verpackung von Stoffen und Gemischen, zur Änderung und Aufhebung der Richtlinien 67/548/EWG und 1999/45/EG und zur Änderung der Verordnung (EG).

EU-Verordnung (EG) Nr. 1272/2008. Fundstelle: Abl. L 353 S. 1 (L 353), 1-1355, zuletzt geprüft am 19.02.2021.

Europäische Kommission (23.07.2009): Verordnung (EG) Nr. 761/2009 der Kommission vom 23. Juli 2009 zur Änderung der Verordnung (EG) Nr. 440/2008 zur Festlegung von Prüfmethoden gemäß der Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 des Europäischen Parlaments und des Rates zur Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung chemischer Stoffe (REACH) zwecks Anpassung an den technischen Fortschritt, EU-Verordnung (EG) Nr. 761/2009. Fundstelle: Abl. L 220 S. 1. In: Amtsblatt der Europäischen Union. Online verfügbar unter https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32009R0761&qid=1591272784344&from=DE, zuletzt geprüft am 19.02.2021.

Europäische Kommission (Hg.) (2012): Eurecomp - Recycling Thermoset Composites of the SST. Final Summary Report. Online verfügbar unter https://cordis.europa.eu/project/id/218609/reporting.

Europäische Kommission (Hg.) (2017): Horizon 2020 - Work programme 2016-2017. Part 20 - General Annexes. Online verfügbar unter https://ec.europa.eu/research/participants/data/ref/h2020/other/wp/2016-2017/annexes/h2020-wp1617-annex-ga_en.pdf, zuletzt geprüft am 25.11.2020.

Europäischen Union (31.03.2011): Verordnung (EU) Nr. 333/2011 des Rates vom 31. Marz 2011 mit Kriterien zur Festlegung, wann bestimmte Arten von Schrott gemäß der Richtlinie 2008/98/EG des Europäischen Parlaments und des Rates nicht mehr als Abfall anzusehen sind. EU-Verordnung (EG) Nr. 333/2011. Online verfügbar unter https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32011R0333&from=DE, zuletzt geprüft am 19.02.2021.

Europäischen Union (25.07.2013): Verordnung (EU) Nr. 715/2013. EU-Verordnung (EG) Nr. 715/20136. Online verfügbar unter https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32013R0715, zuletzt geprüft am 14.04.2021.

European Aluminium (Hg.) (2019): Vision 2050 - Der Beitrag von European Aluminium zum EU-Fahrplan für eine Kohlenstoffarme Wirtschaft bis 2050. Eine Vision für strategisches, kohlenstoffarmes und wettbewerbsfähiges Aluminium. Brüssel. Online verfügbar unter https://www.european-aluminium.eu/media/2547/european-aluminium_executive-summary-vision-2050_de.pdf, zuletzt geprüft am 07.12.2020.

European Composites Industry Association: Composites Recycling Made Easy. Online verfügbar unter https://eucia.eu/userfiles/files/20130207_eucia_brochure_recycling.pdf, zuletzt geprüft am 10.09.2021.

Eyerer, Peter; Schüle, Helmut; Elsner, Peter (Hg.) (2020): Polymer Engineering 3. Werkstoff- und Bauteilprüfung, Recycling, Entwicklung. 2. Aufl. Berlin: Springer Vieweg.

Fakorede, Oloufemi; Feger, Zoé; Ibrahim, Hussein; Ilinca, Adrian; Perron, Jean; Masson, Christian (2016): Ice protection systems for wind turbines in cold climate: characteristics, comparisons and analysis. In: *Renew. Sustain. Energy Rev.* 65 (2), S. 662–675. DOI: 10.1016/j.rser.2016.06.080.

FarbeundLack (2017): Regenerosion an Rotorblättern vorbeugen. Online verfügbar unter https://www.farbeundlack.de/artikel/archiv/regenerosion-an-rotorblaettern-vorbeugen, zuletzt geprüft am 20.10.2021.

Feher, L.; Thumm, M. (2004): Microwave Innovation for Industrial Composite Fabrication—The HEPHAISTOS Technology. In: *IEEE Trans. Plasma Sci.* 32 (1), S. 73–79. DOI: 10.1109/TPS.2004.823983.

Feih, S.; Boiocchi, E.; Mathys, G.; Mathys, Z.; Gibson, A. G.; Mouritz, A. P. (2011): Mechanical properties of thermally-treated and recycled glass fibres. In: *Composites Part B: Engineering* 42 (3), S. 350–358. DOI: 10.1016/j.compositesb.2010.12.020.

Fent, Karl (2013): Ökotoxikologie. Umweltchemie, Toxikologie, Ökologie. 4., vollständig überarb. Aufl. Stuttgart: Thieme.

DIN 8589-6, 09.2003: Fertigungsverfahren Spanen.

Fest, Philip; Fechler, Thorben (2016): Neue Anforderungen an Planung und Genehmigung von Windenergieanlagen. In: *NVwZ* 35 (15).

Fielding, C.; Prybyla, S.; Tate, L.; Beckwith, S. W. (Hg.) (2009): SAMPE `09 Spring Symposium. Conference Proceedings. SAMPE '09 Spring Symposium Conf. Baltimore, MD, USA, 18.-21. Mai 2009.

Finitec (2021): Wasserstrahlschneiden. Online verfügbar unter https://finitec.de/wasserstrahlschneiden.html.

Fluck, Jürgen (1992): Ausgewählte Rechtsfragen der Verpackungsverordnung. In: *Der Betrieb*, S. 193–198.

Fonte, Rosario; Xydis, George (2021): Wind turbine blade recycling: An evaluation of the European market potential for recycled composite materials. In: *Journal of environmental management* 287, S. 112269. DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.112269.

Fraunhofer WKI (2021): Inspektion von Rotorblättern mit Wärmefluss-Thermographie. Fraunhofer WKI. Online verfügbar unter https://www.vision.fraunhofer.de/de/technologien-anwendungen/technologien/waermefluss-thermographie/rotorblaetterinspektion.html, zuletzt geprüft am 10.03.2021.

Fraunhofer-Institut für Holzforschung, Wilhelm-Klauditz-Institut (WKI) (Hg.) (2020): ReRoBalsa - Recycling von Rotorblättern zur Verwertung von Balsholz/Schaum für die Herstellung von Dämmstoffen. Abschlussbericht des KMU-Innovativ-Verbundvorhabens. Förderkennzeichen BMBF 033RK041B-D + F-G. Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF). Braunschweig, zuletzt geprüft am 21.01.2021.

Freiburg, Tanja (2017): Co-processing von Rotorblättern und GFK im Zementwerk. 28. Abfalltagung des LLUR, 05.04.2017. Online verfügbar unter https://www.schleswig-holstein.de/DE/Fachinhalte/A/abfallwirtschaft/Downloads/abfalltagungen/2017_Freiburg.pdf?__blob=publicationFile&v=2, zuletzt geprüft am 10.09.2021.

Frenz, Walter (2015): Verantwortlichkeit für Abfälle im Baubereich in neuem Licht? Folgen des Löschwasser-Urteils des BVerwG. In: *AbfallR*, S. 135–144.

Frische, Tobias (2019): Kommentierung § 7 KrWG. In: Arndt Schmehl und Jan Henrik Klement: GK-KrWG. Gemeinschaftskommentar zum Kreislaufwirtschaftsgesetz. Hürth: Carl Heymanns.

Fritz, A. Herbert; Schulze, Günter (Hg.) (2015): Fertigungstechnik. 11., neu bearb. und erg. Aufl. Berlin: Springer Vieweg (Springer-Lehrbuch).

Fuchs, Josef (2013): Ermittlung des Betriebskennfeldes einer innovativen Zweibettwirbelschicht anhand von Kaltmodelluntersuchungen. Masterarbeit. Montanuniversität Leoben, Loeben. Institut für Verfahrenstechnik des industriellen Umweltschutzes. Online verfügbar unter https://pure.unileoben.ac.at/portal/de/publications/ermittlung-des-betriebskennfeldes-einer-innovativen-zweibettwirbelschicht-anhand-von-kaltmodelluntersuchungen(6cd7742f-25ee-49ab-8975-66acc6bd9eae).html?customType=theses, zuletzt geprüft am 08.04.2020.

Fuchs, Nikolai A. (1964): The Mechanics of Aerosols. Oxford: Pergamon Pr.

Fülbier, Viktoria (2017): Die naturschutzrechtliche Eingriffsregelung bei Windenergieanlagen. In: *NuR* 39 (12), S. 804–812. DOI: 10.1007/s10357-017-3267-0.

Funke, Herbert (2001): Systematische Entwicklung von Ultra-Leichtbaukonstruktionen in Faserverbund-Wabensandwichbauweise am Beispiel eines Kleinflugzeuges. Dissertation. Universität Paderborn, Paderborn. Fachbereich 10 Maschinentechnik. Online verfügbar unter https://www.r-g.de/wiki/images/9/99/Dissertation_von_Herbert_Funke.pdf, zuletzt geprüft am 14.07.2022.

Garrido, M. A.; Font, R. (2015): Pyrolysis and combustion study of flexible polyurethane foam. In: *J. Anal. Appl. Pyrolysis* 113, S. 202–215. DOI: 10.1016/j.jaap.2014.12.017.

Garrido, María A.; Font, Rafael; Conesa, Juan A. (2016): Kinetic study and thermal decomposition behavior of viscoelastic memory foam. In: *Energy Convers. Manag.* 119, S. 327–337. DOI: 10.1016/j.enconman.2016.04.048.

Garrido, María A.; Font, Rafael; Conesa, Juan A. (2017): Pollutant emissions from the pyrolysis and combustion of viscoelastic memory foam. In: *Sci. Total Environ.* 577, S. 183–194. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.10.159.

Gatz, Stephan (2013): Windenergieanlagen. In: Hoppenberg und de Witt (Hg.): Handbuch des öffentlichen Baurechts. München: C.H. Beck.

GDA - Gesamtverband der Aluminiumindustrie e.V. (GDA) (Hg.): Aluminium - Ein nachhaltiger Werkstoff. Düsseldorf. Online verfügbar unter https://alu-am-bau.ch/wp-content/uploads/2014/03/03_Nachhaltiger-Werkstoff.pdf, zuletzt geprüft am 12.01.2021.

GDA - Gesamtverband der Aluminiumindustrie e.V. (GDA) (Hg.) (2010): Ressourceneffizienz von Aluminium. Düsseldorf. Online verfügbar unter http://www.aluinfo.de/download.html?did=81, zuletzt geprüft am 20.01.2021.

GDA - Gesamtverband der Aluminiumindustrie e.V. (GDA) (Hg.) (2020): GDA-Jahresbericht 2020. Düsseldorf. Online verfügbar unter http://www.aluinfo.de/files/_media/dokumente/Downloads/Jahresberichte/2020-GDA-Jahresbericht.pdf, zuletzt geprüft am 12.01.2021.

Gellermann, Martin (2017): Kommentierung zu § 14 BNatSchG: Landmann / Rohmer. Umweltrecht: UmweltR. Loseblatt-Kommentar zum Umweltrecht. München: C.H. Beck.

Gen 2 Carbon (Hg.) (2021): Products. Online verfügbar unter https://www.gen2carbon.com/products/, zuletzt geprüft am 28.09.2021.

Gesetz über Naturschutz und Landschaftspflege (29.07.2009), BNatSchG. Fundstelle: BGBl. I S. 2542. In: Bundesgesetzblatt. Online verfügbar unter http://www.gesetze-im-internet.de/bnatschg_2009/BNatSchG.pdf, zuletzt geprüft am 19.02.2021.

BBodSchG (17.03.1998): Gesetz zum Schutz vor schädlichen Bodenveränderungen und zur Sanierung von Altlasten (Bundes-Bodenschutzgesetz). Fundstelle: BGBl. I S. 502. In: Bundesgesetzblatt. Online verfügbar unter https://www.gesetze-im-internet.de/bbodschg/BBodSchG.pdf, zuletzt geprüft am 19.02.2021.

BImSchG (17.05.2013): Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge (Bundes-Immissionsschutzgesetz - BImSchG). Fundstelle: BGBl. I S. 1274. In: Bundesgesetzblatt. Online verfügbar unter https://www.gesetze-im-internet.de/bimschg/BImSchG.pdf, zuletzt geprüft am 19.02.2021.

KrWG (24.02.2012): Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (Kreislaufwirtschaftsgesetz - KrWG). Fundstelle: BGBl. I S. 212. In: Bundesgesetzblatt.

WHG (31.07.2009): Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts (Wasserhaushaltsgesetz - WHG). Fundstelle: BGBl. I S. 2585. In: Bundesgesetzblatt. Online verfügbar unter http://www.gesetze-im-internet.de/whg_2009/WHG.pdf, zuletzt geprüft am 19.02.2021.

Giegrich, J.; Liebich, A.; Fehrenbach, H. (2007): Ableitung von Kriterien zur Beurteilung einer hochwertigen Verwertung gefährlicher Abfälle. F+E Vorhaben Nr. 202 35 310 im Auftrag des Umweltbundesamtes Dessau-Roßlau. Hg. v. Umweltbundesamt (UBA). ifeu - Institut für Energie- und Umweltforschung. Heidelberg. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/3504.pdf, zuletzt geprüft am 03.05.21.

Giesberts, Ludger; Hilf, Juliane (1998): Neue Instrumente zur Steuerung der Altautoentsorgung. Altautoverordnung und freiwillige Selbstverpflichtung. In: *NVwZ*.

Giesberts, Ludger; Reinhardt, Michael (2018): Umweltrecht. BImSchG, KrWG, BBodSchG, WHG, BNatSchG. München: C.H. Beck.

Gilsbach, Lucas (2020): Kupfer - Information zur Nachhaltigkeit. Hg. v. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. Hannover. Online verfügbar unter https://www.bgr.bund.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/Informationen_Nachhaltigkeit/kupfer.pdf;jsessionid=26035F681897FE437FC444BE27EE2EB6.2_cid321?__blob=publicationFile&v=3, zuletzt geprüft am 09.02.21.

Global EnerTec AG (Hg.): GlobaTec-Technologie (GTT). Online verfügbar unter https://www.global-enertec.de/forschung-technologien/globatec-technologie-gtt/, zuletzt geprüft am 06.10.2021.

Goergen, C.; Baz, S.; Mitschang, P.; Gresser, G. T. (2017): Highly Drapable Organic Sheets Made of Recycled Carbon Staple Fiber Yarns. 21. International Conference on Composite Materials. Xi, 20.08.2017.

Göhler, Daniel; Stintz, Michael (2019): nanoGRAVUR: Gruppierung Freisetzung und Exposition. Schlussbericht. Dresden. Online verfügbar unter https://doi.org/10.2314/KXP:1670045390, zuletzt geprüft am 19.10.2020.

Goodship, V. (Hg.) (2010): Management, Recycling and Reuse of Waste Composites. Oxford: Woohead Publishing (Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering), zuletzt geprüft am 16.08.2021.

Gopalraj, Sankar Karuppannan; Kärki, Timo (2020): A review on the recycling of waste carbon fibre/glass fibre-reinforced composites: fibre recovery, properties and life-cycle analysis. In: *SN Appl. Sci.* 2 (3). DOI: 10.1007/s42452-020-2195-4.

Grabau, Peter (1996): A method and a system for deicing of airfoil wings of composite material. Veröffentlichungsnr: WO1998001340A1.

Greim, Helmut (Hg.) (2017): Das Toxikologiebuch. Grundlagen, Verfahren, Bewertung. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. Online verfügbar unter https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/9783527695447, zuletzt geprüft am 22.01.2019.

Greville, Anne (2019): Occupational noise levels. A collection of reported measurements. Hg. v. ACC. Neuseeland (ACC 8023). Online verfügbar unter https://www.acc.co.nz/assets/provider/occupational-noise-levels-reported-measures-acc8023.pdf, zuletzt geprüft am 05.03.2021.

Grimm, Roland (2019): Baustoffe aus Windkraft-Rotorblättern. In: *BaustoffWissen*. Online verfügbar unter https://www.baustoffwissen.de/baustoffe/baustoffknowhow/forschung_technik_trends/baustoffe-aus-windkraft-rotorblaettern/, zuletzt geprüft am 20.10.2020.

Grittner, N. (1994): Untersuchungen zur Wirbelschichtpyrolyse von Polyether-Polyurethanen sowie Enwtwicklung und Erprobung einer oxidierenden Stufe zur Prozeßwärmeerzeugung aus Pyrolysereststoffen. Dissertation. Universität Hamburg, Hamburg.

Grittner, N.; Kaminsky, W.; Obst, G. (1993): Fluid bed pyrolysis of anhydride-hardened epoxy resins and polyether-polyurethane by the Hamburg process. In: *J. Anal. Appl. Pyrolysis* 25, S. 293–299. DOI: 10.1016/0165-2370(93)80048-5.

Große, Anna; Naumann, Romy; Hofmann, Marcel; Kehren, Dominic; Bäger, Daphne; Plitzko, Sabine (2021): CarboBreak – Conditions and Mechanisms for Releasing Alveolar Fibrous Carbon Fibre Fragments. Aachen-Dresden-Denkendorf International Textile Conference 2021. Deutschen Institute für Textil- und Faserforschung Denkendorf (DITF). Stuttgart, 09.11.2021. Online verfügbar unter https://nanopartikel.info/wp-content/uploads/2021/11/CarboBreak_Poster_STFI_Final_web2.pdf, zuletzt geprüft am 09.02.2022.

Hagmann, Joachim (2013): Abfallerzeuger- und -besitzerhaftung nach dem KrWG. In: *AbfallR* 12 (4), S. 150–156.

Hagnell, M. K.; Åkermo, M. (2019): The economic and mechanical potential of closed loop material usage and recycling of fibre-reinforced composite materials. In: *J. Clean Prod.* 223, S. 957–968. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.03.156.

Hamann (2020): Konzeption und Pilotierung eines Verfahrens zur vollständigen stofflichen Verwertung kohlenstofffaserhaltiger Abfälle. DBU-Projekt "CarbonRevive". Online verfügbar unter https://www.dbu.de/OPAC/ab/DBU-Abschlussbericht-AZ-34400_01-Hauptbericht.pdf, zuletzt geprüft am 14.12.2021.

Hancock, Mark (2011): A wind trubine rotor blade having a buckling trailing edge. Angemeldet durch VESTAS WIND SYS AS [DK]; HANCOCK MARK [GB] am 19.01.2011. Anmeldenr: WO2011DK50015 20110119. Veröffentlichungsnr: WO2011088834 (A2). Prioriätsdaten: DK2010PA70019 20100121;US20100297290P 20100122.

Hansmann, Klaus (1993): Die Nachsorgepflichten im Immissionsschutzrecht. In: *NVwZ*, S. 921–928.

Hasan, M.M.B.; Nitsche, S.; Abdkader, A.; Cherif, Ch (2018): Carbon fibre reinforced thermoplastic composites developed from innovative hybrid yarn structures consisting of staple carbon fibres and polyamide 6 fibres. In: *Compos Sci. Technol.* 167, S. 379–387. DOI: 10.1016/j.compscitech.2018.08.030.

Hau, Erich (2014): Windkraftanlagen. Grundlagen, Technik, Einsatz, Wirtschaftlichkeit. 5. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin / Heidelberg.

Hechler, J. (2019): Optimization of the Dismantling Process of Wind Turbine Blades from Offshore Wind Farms during Decommissioning. Masterarbeit. Western Norway University of Applied Sciences.

Hedlund-Åström, Anna (2005): Model for end of life treatment of polymer composite materials. Dissertation. Kungliga Tekniska högskolan, Stockholm.

Heine, Michael; Detter, Andreas (2020): Rotorblätter für standsichere Bäume. In: *AFZ* (20), S. 26–27.

Heslehurst (2015): Structural repair methodology for wind turbine blades. Australian Composite Conference 2015. Gold Coast, Queensland, Australia, April 2015.

Hessisches Ministeriums für Wirtschaft, Energie, Verkehr und Wohnen; Hessisches Ministeriums für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (27.08.2019): Umsetzung der bauplanungsrechtlichen Anforderungen zur Rückbauverpflichtung und Sicherheitsleistung nach § 35 Abs. 5 Satz 2 und 3 BauGB bei der Genehmigung von Windenergieanlagen im Außenbereich. VII 3-A - 028-f-02-02, II 4 - 3a-04-17. Online verfügbar unter https://www.rv.hessenrecht.hessen.de/bshe/document/VVHE-VVHE000016469, zuletzt geprüft am 12.07.2022.

Hildebrandt, Ina (2019): Rückbau von Recycling von Windenergieanlagen. Hintergrundpapier des Bundesverband WindEnergie e.V. Bundesverband WindEnergie e.V. (BWE). Online verfügbar unter https://www.wind-energie.de/fileadmin/redaktion/dokumente/publikationen-oeffentlich/themen/02-technik-und-netze/09-rueckbau/BWE-Hintergrundpapier_Recycling_von_Windenergieanlagen_-_20191115.pdf, zuletzt geprüft am 21.01.21.

Hinds, William C. (1999): Aerosol Technology. Properties, Behavior, and Measurement of Airborne Particles. Second Edition. 2. Aufl. 1 Band. New York: John Wiley & Sons, Inc., zuletzt geprüft am 01.02.2019.

Höfer, Michael J. (2015): Wind Turbine Blade Recycling: An Economic Decision Framework (IE 503 Final Report).

Höffl, Karl (1986): Zerkleinerungs- und Klassiermaschinen. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Hofmann, Alexander (2020): Chemisches Recyclin mit der iCycle-Plattform. Fanzheitliches Recycling von Rotorblättern. CU-Thementag „Neue Technologien für Windrotorblätter mit Blick auf die Materialien und Bauweisen, Repowering, Demontage und Recycling“. Composites United e.V. Zoom-Videokonferenz, 24.11.2020.

Hohmann, A.; Ilg, R. (2020): Umweltwirkungen entlang der Fertigungsprozesskette von CFK Strukturen sowie für Recyclingstrategien. Composites United e.V. Online verfügbar unter https://www.youtube.com/watch?v=sE5RR_8I9xg, zuletzt geprüft am 21.12.2021.

Holcim GmbH (2018): Nachhaltigkeitsbericht 2018. Holcim Deutschland Gruppe. Hg. v. Holcim GmbH. Online verfügbar unter

https://www.holcim.de/sites/germany/files/atoms/files/holcim_nachhaltigkeitsbericht_2018.pdf, zuletzt geprüft am 10.09.2021.

Holzmueller, Jürgen (2014): Gutachterliche Nachweisführung für den Weiterbetrieb von Windenergieanlagen. Die Sachverständigen für Erneuerbare Energien, 2014.

Hornberg, Claudia; Niekisch, Manfred; Callies, Christian; Kemfert, Claudia; Lucht, Wolfgang; Messari-Becker, Lamia; Rotter, Vera Susanne: Für eine entschlossene Umweltpolitik in Deutschland und Europa. Umweltgutachten 2020. Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU). Berlin.

Howarth, Jack; Mareddy, Sada S.R.; Mativenga, Paul T. (2014): Energy intensity and environmental analysis of mechanical recycling of carbon fibre composite. In: *J. Clean Prod.* 81, S. 46–50. DOI: 10.1016/j.jclepro.2014.06.023.

Hüther, Jonas Johannes (2020): The Impact of Recycling on the Fibre and the Composite Properties of Carbon Fibre Reinforced Plastics. Dissertation. Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe. Institut für Angewandte Materialien.

IARC; World Health Organization; IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans (2002): Man-made vitreous fibres. Lyon: IARC (IARC monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans, 81), zuletzt geprüft am 25.11.2020.

ICRP (2000): Guide for the Practical Application of the ICRP Human Respiratory Tract Model: Elsevier Science Ltd (ICRP Supporting Guidance 3).

Ierides, Marcos; Reiland, Johanna (2019): Wind turbine blade circularity. Technologies and practices around the value chain. Hg. v. Bax & Company. Online verfügbar unter https://baxcompany.com/wp-content/uploads/2019/06/wind-turbine-circularity.pdf, zuletzt geprüft am.

IFA (2013): Das Messsystem Gefährdungsermittlung der UV-Träger (MGU). 7., rev. Ausg. Berlin: Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung, zuletzt geprüft am 02.12.2020.

Imenokhoyev, Ivan; Windsheimer, Hans; Waitz, Roland; Kintsel, Nadja, Linn, Horst (2012): Mikrowellenerwärmungstechnik: Potentiale und Grenzen. Online verfügbar unter https://www.linn-high-therm.de/de/ueber-uns/download/publikationen.html, zuletzt geprüft am 21.02.2022.

Institut für Integrierte Produktion Hannover (2018): Wohin mit ausgedienten Windanlagen? Online verfügbar unter https://www.iph-hannover.de/_media/files/downloads/Jahresbericht_2018_Forschung_DemoNetXXL.pdf, zuletzt geprüft am 18.01.2021.

International Agency for Reserach in Cancer (IARC) (2019): IARC Monographs on the Identification of Carcinogenic Hazards to Humans. Preamble. Hg. v. World Health Organization. Lyon, France, zuletzt geprüft am 01.03.2021.

Jacobj, Holger (2019): Kommentierung zu §§ 3, 22 KrWG. In: Versteyl, Mann und Schomerus: Kreislaufwirtschaftsgesetz: KrWG. München: C.H. Beck.

Jamieson, Peter (2018): Innovation in wind turbine design. Second edition. Hoboken, N.J.: Wiley.

Japan Carbon Fiber Manufacturers Association (Hg.) (2013): Recycling of Carbon Fiber. Pilot Plant Stage R&D of Recycling Technology of Carbon Fiber. Online verfügbar unter https://www.carbonfiber.gr.jp/english/tech/recycle.html, zuletzt aktualisiert am 26.04.2013, zuletzt geprüft am 18.10.2021.

Jarass, Hans D. (2020): Bundes-Immissionsschutzgesetz: BImSchG. Kommentar. unter Berücksichtigung der Bundes-Immissionsschutzverordnungen, der TA Luft sowie der TA Lärm. München: C.H. Beck.

Jarass, Hans D.; Petersen, Frank (2014): Kreislaufwirtschaftsgesetz. KrWG. München: C.H. Beck.

Jay, Mary Lou (2020): Reclaim, Reuse and Reap the Rewards. Hg. v. Composites Manufacturing Magazine. Online verfügbar unter http://compositesmanufacturingmagazine.com/2020/05/reclaim-reuse-and-reap-the-rewards/3/, zuletzt aktualisiert am 06.05.2020, zuletzt geprüft am 18.10.2021.

Jensen, J. P.; Skelton, K. (2018): Wind turbine blade recycling: Experiences, challenges and possibilities in a circular economy. In: *Renew. Sustain. Energy Rev.* 97, S. 165–176. DOI: 10.1016/j.rser.2018.08.041.

Jiang, G.; Pickering, S. J.; Walker, G. S.; Wong, K. H.; Rudd, C. D. (2008): Surface characterisation of carbon fibre recycled using fluidised bed. In: *Appl. Surf. Sci.* 254 (9), S. 2588–2593. DOI: 10.1016/j.apsusc.2007.09.105.

Jiang, Jianjun; Deng, Guoli; Chen, Xing; Gao, Xinyu; Guo, Qiang; Xu, Chumeng; Zhou, Linchao (2017): On the successful chemical recycling of carbon fiber/epoxy resin composites under the mild condition. In: *Compos Sci. Technol.* 151, S. 243–251. DOI: 10.1016/j.compscitech.2017.08.007.

Job, Stella; Leeke, G. A.; Mativenga, Paul T.; Oliveux, G.; Pickering, S. J.; Shuaib, Norshah A. (2016): Composites Recycling: Where are we now? Online verfügbar unter https://compositesuk.co.uk/system/files/documents/Recycling%20Report%202016.pdf, zuletzt geprüft am 26.08.21.

Judge, Paul William (2010): Segmented wind turbine blades. Angemeldet durch GEN ELECTRIC [US] am 15.04.2010. Anmeldenr: EP20100159976 20100415. Veröffentlichungsnr: EP2249027 (A2). F03D1/06;B29C65/00. Prioriätsdaten: US20090431281 20090428.

Kalla, D. K.; Zhang, B.; Asmatulu, R.; Dhanasekaran, P. S. (2012): Current Research Trends in Abrasive Waterjet Machining of Fiber Reinforced Composites. In: *Mater. Sci. Forum* 713, S. 37–42. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.713.37.

Karborek RCF (Hg.): Karborek. Recycling Carbon Fibres. Online verfügbar unter http://www.karborekrcf.it/index_eng.html, zuletzt geprüft am 22.07.2021.

Kehren, Dominic; Simonow, Barbara; Bäger, Daphne; Dziurowitz, Nico; Wenzlaff, Daniela; Thim, Carmen et al. (2019): Release of Respirable Fibrous Dust from Carbon Fibers Due to Splitting along the Fiber Axis. In: *Aerosol Air Qual. Res.* 19 (10), S. 2185–2195. DOI: 10.4209/aaqr.2019.03.0149.

Keith, Matthew; Oliveux, Géraldine; Leeke, Gary A. (2016): Optimisation of solvolysis for recycling carbon fibre reinforced composites. Unter Mitarbeit von Spitzencluster MAI Carbon gemeinsam mit dem Lehrstuhl für Carbon Composites (LCC) der TU München. In: Carbon Cluster Management GmbH (Hg.): ECCM17 - 17th European Conference on Composite Materials Munich, Germany, 26-30th June 2016, Bd. 17. ECCM17 - 17th European Conference on Composite Materials. München, 26.-30. Juni 2016. Online verfügbar unter https://www.researchgate.net/publication/305043711_OPTIMISATION_OF_SOLVOLYSIS_FOR_RECYCLING_CARBON_FIBRE_REINFORCED_COMPOSITES, zuletzt geprüft am 23.11.2021.

Kemona, Aleksandra; Piotrowska, Małgorzata (2020): Polyurethane Recycling and Disposal: Methods and Prospects. In: *Polymers* 12 (8). DOI: 10.3390/polym12081752.

Kempf, Manuel (2016): Polyurethanharze für Hochleistungs-Faserverbundwerkstoffe in Rotorblättern und Windenergieanlagen. Dissertation.

Kim, Kwan-Woo; Jeong, Jin-Soo; An, Kay-Hyeok; Kim, Byung-Joo (2019): A Low Energy Recycling Technique of Carbon Fibers-Reinforced Epoxy Matrix Composites. In: *Ind. Eng. Chem. Res.* 58 (2), S. 618–624. DOI: 10.1021/acs.iecr.8b02554.

Kim, Kwan-Woo; Lee, Hye-Min; An, Jeong-Hun; Chung, Dong-Chul; An, Kay-Hyeok; Kim, Byung-Joo (2017): Recycling and characterization of carbon fibers from carbon fiber reinforced epoxy matrix composites by a novel super-heated-steam method. In: *J. Environ. Manag.* 203 (Pt 3), S. 872–879. DOI: 10.1016/j.jenvman.2017.05.015.

KIT - IHM (2010): Fragmentierung und Auftrennung von Verbundwerkstoffen und Mineralien mittels gepulster elektrischer Entladungen, zuletzt geprüft am 19.10.2021.

Kjærside Storm, B. (2013a): 12 - Surface protection and coatings for wind turbine rotor blades. In: Povl Brøndsted und Rogier P.L. Nijssen (Hg.): Advances in Wind Turbine Blade Design and Materials :

Woodhead Publishing Series in Energy: Woodhead Publishing, S. 387–412. Online verfügbar unter https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B978085709426150012X.

Kjærside Storm, B. (2013b): Surface protection and coatings for wind turbine rotor blades. In: P. Brøndsted (Hg.): Wind turbine blade design and materials. Oxford: Woodhead Publishing (Woodhead Publishing series in energy, 47), S. 387–412.

Kloepfer, Michael (2016): Umweltrecht. 4. Aufl. München: C.H. Beck.

Knecht, Daniel (2015): Untersuchungen zum Seilsägeprozess an Stählen ausgewählter Geometrien im umschlingenden Verfahren. Karlsruher Institut für Technologie (KIT). Institut für Technologie und Management im Baubetrieb (TMB).

Koegler, Klaus U.; Herr, Stefan; Fisher, Murray (2007): Wind turbine blades with trailing edge serrations. Angemeldet durch GEN ELECTRIC am 19.09.2007. Anmeldenr: US20070857844 20070919. Veröffentlichungsnr: US2009074585 (A1). F03D11/00;F01D5/14. Prioriätsdaten: US20070857844 20070919.

Kopp-Assenmacher, Stefan (2015): Kommentierung zu § 5 KrWG. In: Stefan Kopp-Assenmacher: KrWG. Kreislaufwirtschaftsgesetz. Berlin: Erich Schmidt Verlag.

Krahnefeld, Lutz; Conzelmann, Ruben (2014): Abfallgrundpflichten und fünfstufige Abfallhierarchie – Bedeutung für Betreiber genehmigungsbedürftiger BImSchG-Anlagen. In: *I+E* 4, S. 7–16.

Kramer, Bernd; Becker, Torsten; Hamann, Dorothea; Böhm, Monika: Konzeption und Pilotierung eines Verfahrens zur vollständigen stofflichen Verwertung kohlenstofffaserhaltiger Abfälle. DBU-Projekt „CarbonRevive“ Abschlussbericht. Hg. v. SiC Processing GmbH, TU Bergakademie Freiberg und TU Chemnitz, zuletzt geprüft am 18.10.2021.

Kramer, Bernd; Becker, Torsten; Hamm, Dorothea; Böhm, Monika (2020): Konzeption und Pilotierung eines Verfahrens zur vollständigen stofflichen Verwertung kohlenstofffaserhaltiger Abfälle, AZ 34400/01. Hg. v. Deutsche Bundesstiftung Umwelt. SiC Processing (Deutschland) GmbH, Bautzen; Technische Universität Bergakademie Freiberg; Technische Universität Chemnitz. Osnabrück (34400).

Krampitz, Thomas; Zöllner, Mareen; Lieberwirth, Holger; Kamptner, Andre; Friedrich, Jens (2020): Feinstzerkleinerung von CFK-Abfällen und Charakterisierung der Zerkleinerungsprodukte. In: *Chem. Ing. Tech.* 92 (4), 476-484. DOI: 10.1002/cite.201900176.

Krassnig, H.-J.; Luidold, S.; Antrekowitsch, H.; Kleimt, B.; Voj, L. (2007): Energie- und Stoffbilanzierung eines 36-t-Elektrolichtbogenofens. In: *Berg- Hüttenmänn. Mon.h.* 152 (9), S. 287–291. Online verfügbar unter https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2Fs00501-007-0312-y.pdf, zuletzt geprüft am 20.02.2019.

Krauklis, Andrey E.; Karl, Christian W.; Gagani, Abedin I.; Jørgensen, Jens K. (2021): Composite Material Recycling Technology—State-of-the-Art and Sustainable Development for the 2020s. In: *J. Compos. Sci.* 5 (1), S. 1–33. DOI: 10.3390/jcs5010028.

Kropp, Olaf (2015): Wer ist Erzeuger von Bau- und Abbruchabfällen? Zum Beitrag von Frenz, „Verantwortlichkeit für Abfälle im Baubereich in neuem Licht?“, AbfallR 2015, 135 ff. In: *AbfallR* 14 (5), S. 223–233.

Kumagai, Shogo; Motokucho, Suguru; Yabuki, Ryosuke; Anzai, Airi; Kameda, Tomohito; Watanabe, Atsushi et al. (2017): Effects of hard- and soft-segment composition on pyrolysis characteristics of MDI, BD, and PTMG-based polyurethane elastomers. In: *J. Anal. Appl. Pyrolysis* 126, S. 337–345. DOI: 10.1016/j.jaap.2017.05.012.

Kumar, Sudheer; Krishnan, Sukhila (2020): Recycling of carbon fiber with epoxy composites by chemical recycling for future perspective: a review. In: *Chem. Pap.* 74 (11), S. 3785–3807. DOI: 10.1007/s11696-020-01198-y.

Land Sachsen-Anhalt: Bauordnung des Landes Sachsen-Anhalt. BauO LSA, vom 10.09.2013.

Land Thüringen: Gesetz zur Erhaltung, zum Schutz und zur Bewirtschaftung des Waldes und zur Förderung der Forstwirtschaft. ThürWaldG, vom 06.08.1993.

Landesamt für Umweltschutz Sachsen Anhalt (2018): Entsorgungsmöglichkeiten von glas- und kohlefaserhaltigen Abfällen. Online verfügbar unter https://lau.sachsen-anhalt.de/fileadmin/Bibliothek/Politik_und_Verwaltung/MLU/LAU/Abfallwirtschaft/Abfallstatistik/Dateien/Faserverstaerkte_Kunststoffe.pdf, zuletzt geprüft am 14.12.2021.

Lange, Mika (2020): Anforderungen an die Entsorgung und das Recycling. Rückbau, Verwertung und Recycling von. Bundesverband WindEnergie e.V. (BWE). Online, 27.10.2020.

Lange, Mika (2021): Recycling von Rotorblättern - vom Werkstoff zum Wertstoff. Verwertung und Recycling von Windenergieanlagen. Bundesverband für Energie. Online Webinar, 11.02.2021.

Lauscha Fiber International GmbH: E-glass microfibres.

Lee, Jae Hun; Kim, Kwang Seok; Kim, Hyo (2013): Determination of kinetic parameters during the thermal decomposition of epoxy/carbon fiber composite material. In: *Korean J. Chem. Eng.* 30 (4), S. 955–962. DOI: 10.1007/s11814-012-0224-8.

Lefeuvre, Anaële; Garnier, Sébastien; Jacquemin, Leslie; Pillain, Baptiste; Sonnemann, Guido (2019): Anticipating in-use stocks of carbon fibre reinforced polymers and related waste generated by the wind power sector until 2050. In: *Resour. Conserv. Recycl.* 141, S. 30–39. DOI: 10.1016/j.resconrec.2018.10.008.

Lekou, Denja; Rossis, Kyriakos; van Wingerde, A. M.; Jacobsen, T. K.; Vionis, P.; Velasco Mateos, I. (2006): Repair Techniques for Composite Materials applicable to wind turbine blades. In: *Proceedings of the 27th Riso*. Online verfügbar unter https://www.researchgate.net/publication/263178554_REPAIR_TECHNIQUES_FOR_COMPOSITE_MATERIALS_APPLICABLE_TO_WIND_TURBINE_BLADES, zuletzt geprüft am 14.07.2022.

Lengsfeld, Hauke; Mainka, Hendrik; Altstädt, Volker (2019): Carbonfasern. Herstellung, Anwendung, Verarbeitung. München: Hanser.

Leonhardt, G. (Hg.) (1997): Recycling von Verbundwerkstoffen und Werkstoffverbunden. Frankfurt: DGM Informationsgesellschaft Verl.

Li, Dongsheng; Ho, Siu-Chun M.; Song, Gangbing; Ren, Liang; Li, Hongnan (2015): A review of damage detection methods for wind turbine blades. In: *Smart Mater. Struct.* 24 (3), S. 33001. DOI: 10.1088/0964-1726/24/3/033001.

Li, Xiang; Bai, Ruibin; McKechnie, Jon (2016): Environmental and financial performance of mechanical recycling of carbon fibre reinforced polymers and comparison with conventional disposal routes. In: *Journal of Cleaner Production* 127, S. 451–460. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.03.139.

Lichtenegger, Georg; Rentizelas, Athanasios A.; Trivyza, Nikoletta; Siegl, Stefan (2020): Offshore and onshore wind turbine blade waste material forecast at a regional level in Europe until 2050. In: *Waste management (New York, N.Y.)* 106, S. 120–131. DOI: 10.1016/j.wasman.2020.03.018.

Limburg, Marco; Stockschläder, Jan; Quicker, Peter (2019): Thermal treatment of carbon fibre reinforced polymers (Part 1: Recycling). In: *Waste Manag. Res.* 37 (1_suppl), S. 73–82. DOI: 10.1177/0734242X18820251.

Liu, B. Y. H.; Pui, D. Y. H.; Wang, X. Q.; Lewis, C. W. (1983): Sampling of Carbon Fiber Aerosols. In: *Aerosol Sci. Technol.* 2 (4), S. 499–511. DOI: 10.1080/02786828308958653.

Liu, P.; Barlow, C. Y. (2016): The environmental impact of wind turbine blades. In: *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 139. DOI: 10.1088/1757-899X/139/1/012032.

Liu, Pu; Barlow, Claire Y. (2017): Wind turbine blade waste in 2050. In: *Waste Manag.* 62, S. 229–240. DOI: 10.1016/j.wasman.2017.02.007.

Liu, Pu; Meng, Fanran; Barlow, Claire Y. (2019): Wind turbine blade end-of-life options: An eco-audit comparison. In: *J. Clean Prod.* 212, S. 1268–1281. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.12.043.

LM Wind Power (2010): LM 37.3 P2 Technical Manual (MANUAL 072000).

Ludwig, Grit; Gawel, Eric; Pannicke, Nadine (2016): Kreislaufwirtschaft im Bereich Holz. Rechtliche Bestandsaufnahme und Reformvorschläge für Kaskadennutzungen. In: *AbfallR* 15 (4), S. 170–178.

DIN ISO 7708, Januar 1996: Luftbeschaffenheit - Festlegung von Partikelgrößenverteilungen für die gesundheitsbezogene Schwebstaubprobennahme.

Madesen, Søren Find; Carloni, Lisa (2017): Lightning exposure of Carbon Fiber Composites in wind turbine blades. In: *NORD-IS* (24). DOI: 10.5324/nordis.v0i24.2293.

Madi, Ezieddin; Pope, Kevin; Huang, Weimin; Iqbal, Tariq (2019): A review of integrating ice detection and mitigation for wind turbine blades. In: *Renew. Sustain. Energy Rev.* 103 (10), S. 269–281. DOI: 10.1016/j.rser.2018.12.019.

Malte Moeller, Horst Linn: Dielectric heating, zuletzt geprüft am 12.10.2021.

Manis, F. (2021): MAI CC4 CaRinA – Carbonfaser Recyclingwerkstoffe für industrielle Anwendungen. Carbonfaser Recyclingwerkstoffe für industrielle Anwendungen. Hg. v. Fraunhofer IGCV. Online verfügbar unter https://www.igcv.fraunhofer.de/de/forschung/referenzprojekte/CaRinA.html, zuletzt geprüft am 21.12.2021.

Mann, Thomas (2019): Kommentierung zu § 23 KrWG. In: Versteyl, Mann und Schomerus: Kreislaufwirtschaftsgesetz: KrWG. München: C.H. Beck.

Mansuri, Irshad; Khanna, Rita; Sahajwalla, Veena (2017): Recycling Carbonaceous Industrial/Commercial Waste as a Carbon Resource in Iron and Steelmaking. In: *Steel Res. Int.* 88 (6), S. 1600333. DOI: 10.1002/srin.201600333.

Marquard, Lennart (2020): Windenergieplanung ins Ungewisse § 35 Abs. 3 Satz 3 BauGB als Auslaufmodell? In: *ZUR* 31 (11).

Marsh, George (2017): What's to be done with ‘spent’ wind turbine blades? In: *Renew. Energy Focus* 22-23, S. 20–23. DOI: 10.1016/j.ref.2017.10.002.

Martens, Hans; Goldmann, Daniel (2016): Recyclingtechnik. Fachbuch für Lehre und Praxis. 2. Aufl. 2016. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.

Martinez-Luengo, Maria; Kolios, Athanasios; Wang, Lin (2016): Structural health monitoring of offshore wind turbines: A review through the Statistical Pattern Recognition Paradigm. In: *Renew. Sustain. Energy Rev.* 64, S. 91–105. DOI: 10.1016/j.rser.2016.05.085.

Maslaton, Martin (2019): Die Auflösung des Spannungsverhältnisses zwischen Klimaschutz und Artenschutz durch eine TA ArtenschutzWind? In: *NVwZ* 38 (15).

MaStR (2020a): Marktstammdatenregister. Online verfügbar unter https://www.marktstammdatenregister.de/MaStR, zuletzt aktualisiert am 14.07.2022.000Z, zuletzt geprüft am 09.02.2021.

MaStR (2020b): Marktstammdatenregister. Öffentliche Einheitenübersicht. Online verfügbar unter https://www.marktstammdatenregister.de/MaStR/Einheit/Einheiten/OeffentlicheEinheitenuebersicht#stromerzeugung, zuletzt aktualisiert am 15.07.2022.000Z, zuletzt geprüft am 15.07.2022.289Z.

MaStR (2020c): Marktstammdatenregister. Statistik. Online verfügbar unter https://www.marktstammdatenregister.de/MaStRHilfe/subpages/statistik.html, zuletzt geprüft am 13.10.2020.

MaStR (2020d): Marktstammdatenregister. Ziele und Konzepte. Online verfügbar unter https://www.marktstammdatenregister.de/MaStRHilfe/subpages/zieleKonzepte.html, zuletzt geprüft am 13.10.2020.

Mativenga, Paul T.; Shuaib, Norshah A.; Howarth, Jack; Pestalozzi, Fadri; Woidasky, Jörg (2016): High voltage fragmentation and mechanical recycling of glass fibre thermoset composite. In: *CIRP Ann. - Manuf. Technol.* 65 (1), S. 45–48. DOI: 10.1016/j.cirp.2016.04.107.

Mattenklott, Markus; Gelder, Rainer van (2019): Carbonfasern und Carbonfaserverstärkte Kunststoffe (CFK). In: *Gefahrst. - Reinhalt. Luft* (9), S. 317–322.

Matthies, Frank (2019): Rotorblätter, Windrad, Recycling, Umetec, BTU Cottbus - Senftenberg / LSW. o.O. Online verfügbar unter https://www.youtube.com/watch?v=hsBJF7Fk9uA, zuletzt geprüft am 03.05.2021.

Mattsson, C.; André, A.; Juntikka, M.; Tränkle, T.; Sott, R. (2020): Chemical recycling of End-of-Life wind turbine blades by solvolysis/HTL. In: *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 942, S. 12013. DOI: 10.1088/1757-899X/942/1/012013.

Meinlschmidt, Peter (2017): Recycling von Rotorblättern zur Verwertung von Balsaholz/Schaum für die Herstellung von Dämmstoffen. ReRoBalsa, zuletzt geprüft am 20.10.2021.

Meng, F.; McKechnie, J.; Turner, T. A.; Pickering, S. J. (2017): Energy and environmental assessment and reuse of fluidised bed recycled carbon fibres. In: *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 100 (8), S. 206–214. DOI: 10.1016/j.compositesa.2017.05.008.

Meng, Fanran (2017): Environmental and cost analysis of carbon fibre composites recycling. Dissertation. University of Nottingham, Nottingham, zuletzt geprüft am 16.04.2020.

VDI-Richtlinie 3861 - 2, Januar 2008: Messen von Emissionen Messen anorganischer faserförmiger Partikeln im strömenden Reingas, zuletzt geprüft am 24.01.2019.

Metalle Schmidt GmbH (Hg.): Technisches Datenblatt von Kupferdrähten. Online verfügbar unter https://www.metalleschmidt.de/de/draht/kupfer/, zuletzt geprüft am 03.05.2021.

Meyer, Franz (2011): Carbid mit Kunststoffabfällen produzieren. Ein neues Verfahren geht in den Regelbetrieb. Hg. v. FIZ Karlsruhe GmbH Leibniz-Institut für Informationsinfrastruktur (BINE Projektinfo Energieforschung konkret, 08/2011). Online verfügbar unter https://api.deutsche-digitale-bibliothek.de/binary/27f616f0-8ac3-4900-bd24-25c3d566189b.pdf, zuletzt geprüft am 15.03.2021.

Meyer, Leif Ole (2009): Abfallaufbereitungsverfahren und Anordnung dazu am 04.05.2009. Anmeldenr: 09741759.6. Veröffentlichungsnr: EP 2 282 879 B1.

Michaeli, W.; Bittner, M.; Wolters, L. (1993): Stoffliches Kunststoff-Recycling. Anlagen, Komponenten, Hersteller. München: Hanser.

Miesenburg, Jan (2020): Nachhaltiger Rückbau von Windenergieanlagen. Windenergiecluster M-V. Eno Energy Systems GmbH, 01.10.2020.

Miller, Ricarda; Glaum, Lena; Peter, Matthias (2021): Anforderungen des Bodenschutzes an den Rückbau von Windenergieanlagen - LABO-Projekt B2.20. LABO-Projekt B 2.20: „Erarbeitung eines Leitfadens zu bundesweit einheitlichen Anforderungen des Bodenschutzes beim Rückbau von Windenergieanlagen“. Ober-Mörlen, zuletzt geprüft am 12.07.2022.

Ministerium für Bau und Verkehr des Landes Sachsen–Anhalt (Hg.) (2005): Hinweise zur Umsetzung bauplanungs- und bauordnungsrechtlicher Anforderungen zur Rückbauverpflichtung und Sicherheitsleistung an Windenergieanlagen (WEA). Magdeburg, zuletzt geprüft am 12.07.2022.

Mishnaevsky, Leon (2019): Repair of wind turbine blades: Review of methods and related computational mechanics problems. In: *Renew. Energy* 140 (2), S. 828–839. DOI: 10.1016/j.renene.2019.03.113.

Mishnaevsky, Leon; Branner, Kim; Petersen, Helga Nørgaard; Beauson, Justine; McGugan, Malcolm; Sørensen, Bent F. (2017): Materials for Wind Turbine Blades: An Overview. In: *Materials* 10 (11). DOI: 10.3390/ma10111285.

Mitschang, Stephan; Reidt, Olaf (2019): Kommentierung zu § 35 BauGB. In: Battis, Krautzberger und Löhr: Baugesetzbuch: BauGB: C.H. Beck.

Mitsubishi Chemical Advanced Materials GmbH (Hg.) (2021): carboNXT Produkte. Online verfügbar unter https://www.carbonxt.de/de/produkte/, zuletzt geprüft am 22.07.2021.

Mittelstein, Jan; Wurster, Elena (2020): Rückbau von Windenergieanlagen. In: *BauR - Baurecht*, S. 729–737.

Morgan, Peter (2005): Carbon fibers and their composites. Boca Raton, FL, USA: Taylor & Francis Group.

Morin, Christelle; Loppinet-Serani, Anne; Cansell, François; Aymonier, Cyril (2012): Near- and supercritical solvolysis of carbon fibre reinforced polymers (CFRPs) for recycling carbon fibers as a valuable resource: State of the art. In: *J. Supercrit. Fluids* 66, S. 232–240. DOI: 10.1016/j.supflu.2012.02.001.

Mortimer, Charles E.; Müller, Ulrich (2020): Chemie: Das Basiswissen der Chemie. Stuttgart: Georg Thieme Verlag.

Müggenborg, Hans-Jürgen (2016): § 13 KrWG. In: Alexander Schink, Andrea Versteyl, Martin Dippel, Andrea Garrelmann, Moritz Grunow, Peter Kersandt et al.: KrWG. Kommentar zum Kreislaufwirtschaftsgesetz. 2. Auflage. Berlin, Brüssel: Der juristische Verlag Lexxion.

Murayama, N.; Shibata, J.; Sakai, K.; Nakajima, S.; Yamamoto, H. (2006): Synthesis of Hydrotalcite-Like Materials from Various Wastes in Aluminum Regeneration Process. In: *Resour. Process.* (53), S. 6–11. DOI: 10.4144/rpsj.53.6.

DIN SPEC 4866:2020-10, Oktober 2020: Nachhaltiger Rückbau, Demontage, Recycling und Verwertung von Windenergieanlagen, zuletzt geprüft am 20.07.2022.

Nagle, Angela J.; Delaney, Emma L.; Bank, Lawrence C.; Leahy, Paul G. (2020): A Comparative Life Cycle Assessment between landfilling and Co-Processing of waste from decommissioned Irish wind turbine blades. In: *Journal of Cleaner Production* 277, S. 123321. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.123321.

Nakajima, Kenichi; Takeda, Osamu; Miki, Takahiro; Matsubae, Kazuyo; Nagasaka, Tetsuya (2011): Thermodynamic analysis for the controllability of elements in the recycling process of metals. In: *Environ. Sci. Technol.* 45 (11), S. 4929–4936. DOI: 10.1021/es104231n.

Nakatani, Jun (2014): Life Cycle Inventory Analysis of Recycling: Mathematical and Graphical Frameworks. In: *Sustainability* 6 (9), S. 6158–6169. DOI: 10.3390/su6096158.

Naqvi, S. R.; Prabhakara, H. Mysore; Bramer, E. A.; Dierkes, W.; Akkerman, R.; Brem, G. (2018): A critical review on recycling of end-of-life carbon fibre/glass fibre reinforced composites waste using pyrolysis towards a circular economy. In: *Resour. Conserv. Recycl.* 136, S. 118–129. DOI: 10.1016/j.resconrec.2018.04.013.

Narayanan, Swaroop (2018): EFFECT OF IN-PLANE FIBER WAVINESS ON THE FAILURE OF FIBER REINFORCED POLYMER COMPOSITES. PhD Thesys. Nanyang Technological University. ENERGY RESEARCH INSTITUTE. Online verfügbar unter http://hdl.handle.net/10356/73702, zuletzt geprüft am 20.10.2020.

Nelson, Jared W.; Riddle, Trey W.; Cairns, Douglas S. (2017): Effects of defects in composite wind turbine blades – Part 1: Characterization and mechanical testing. In: *Wind Energ. Sci.* 2 (2), S. 641–652. DOI: 10.5194/wes-2-641-2017.

9. BImSchV (29.05.1992): Neunte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über das Genehmigungsverfahren - 9. BImSchV). Fundstelle: BGBl. I S. 1001. In: Bundesgesetzblatt. Online verfügbar unter https://www.gesetze-im-internet.de/bimschv_9/9._BImSchV.pdf, zuletzt geprüft am 19.02.2021.

Nickel, Werner (1996): Recycling-Handbuch. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Niebsch, Jenny (2011): Determination of Rotor Imbalances. In: Ofualagba, E. U, G und Ubeku (Hg.): The Analysis and Modelling of a Self-excited Induction Generator Driven by a Variable Speed Wind Turbine: INTECH Open Access Publisher.

Nijssen, R.; Winkel, G. D. de (2016): Developments in materials for offshore wind turbine blades. In: Chong Ng und Ran Li (Hg.): Offshore wind farms. Technologies, design and operation. Amsterdam [u.a.]: Elsevier WP Woodhead Publishing (Woodhead Publishing series in energy, 92), S. 85–104.

Nikolic (2012): Schrottscheren RHS von ATN. Hochleistung im Sektor Industrieabbruch. Online verfügbar unter https://www.abbruchmaschinen.de/neue-geraete/atn/schrottscheren.html, zuletzt geprüft am 14.07.2022.

Nishiyama, Yuya; Kumagai, Shogo; Motokucho, Suguru; Kameda, Tomohito; Saito, Yuko; Watanabe, Atsushi et al. (2020): Temperature-dependent pyrolysis behavior of polyurethane elastomers with different hard- and soft-segment compositions. In: *J. Anal. Appl. Pyrolysis* 145, S. 104754. DOI: 10.1016/j.jaap.2019.104754.

Oberdörster, Günter (2004): Subchronic Carbon Fibre Inhalation Study in Rats, zuletzt geprüft am 02.12.2020.

Obrecht, John M.; Steingrimsson, Arni T. (2014): Trailing edge modifications for wind turbine airfoil. Angemeldet durch SIEMENS AG [DE] am 21.03.2014. Anmeldenr: US201414221726 20140321. Veröffentlichungsnr: US2015267678 (A1). F03D1/06. Prioriätsdaten: US201414221726 20140321.

OECD Guideline 202, 13.04.2004: OECD Guideline for Testing of Chemicals. Online verfügbar unter https://www.oecd-ilibrary.org/docserver/9789264069947-en.pdf?expires=1587452533&id=id&accname=ocid43023314&checksum=093FFA6ADBF9FA22A6BAA1551902DE22, zuletzt geprüft am 21.04.2020.

OECD Guideline 203, 18.06.2019: OECD Guideline for Testing of Chemicals, Section 2. Online verfügbar unter https://www.oecd-ilibrary.org/docserver/9789264069961-en.pdf?expires=1587453079&id=id&accname=ocid43023314&checksum=3855D96159082C9EF1AD3E62228B42E6, zuletzt geprüft am 10.11.2020.

OECD Guideline 211, 02.10.2012: OECD Guideline for the Testing of Chemicals, zuletzt geprüft am 10.11.2020.

OECD Guideline 201, 23.03.2006: OECD Guidelines for the Testing of Chemicals, zuletzt geprüft am 10.11.2020.

Oliveux, Géraldine; Bailleul, Jean-Luc; Le Salle, Eric Gal (2012): Chemical recycling of glass fibre reinforced composites using subcritical water. In: *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.* 43 (11), S. 1809–1818. DOI: 10.1016/j.compositesa.2012.06.008.

Oliveux, Géraldine; Dandy, Luke O.; Leeke, Gary A. (2015): Current status of recycling of fibre reinforced polymers: Review of technologies, reuse and resulting properties. In: *Prog. Mater. Sci.* 72, S. 61–99. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2015.01.004.

Orzol, Carsten H. M.; Ohlmeyer, Martin; Krampitz, Thomas; Jäckel, H.-Georg; Zöllner, Mareen; Lieberwirth, Holger (2017): Voruntersuchungen zur elektrohydraulischen Zerkleinerung von CFRP für das Carbonfaser-Recycling. In: *Chem. Ing. Tech.* 89 (12), S. 1773–1781. DOI: 10.1002/cite.201700024.

Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG (Hg.) (2015): Leitfaden für Kooperative F&E Projekte. Version 2.1. Online verfügbar unter https://www.ffg.at/sites/default/files/dok/il_kooperativefueprojekte_v21.pdf, zuletzt geprüft am 25.11.2020.

Ozoemena, Matthew; Cheung, Wai M.; Hasan, Reaz (2018): Comparative LCA of technology improvement opportunities for a 1.5-MW wind turbine in the context of an onshore wind farm. In: *Clean Techn. Environ. Policy* 20 (1), S. 173–190. DOI: 10.1007/s10098-017-1466-2.

Palmer, J.; Ghita, O. R.; Savage, L.; Evans, K. E. (2009): Successful closed-loop recycling of thermoset composites. In: *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 40 (4), S. 490–498. DOI: 10.1016/j.compositesa.2009.02.002.

Palmer, James Alexander Thomas (2009): Mechanical Recycling of Automotive Composites for Use as Reinforcement in Thermoset Composites. University of Exeter; Engineering. Online verfügbar unter https://eric.exeter.ac.uk/repository/handle/10036/72313.

Paulitsch, Helmut (2012): Verwertungsstrategien für Reststoffe aus der Aluminiumsekundärmetallurgie. Dissertation. Montanuniversität Leoben, Leoben. Nichteisenmetallurgie.

Paulitsch, Helmut; Antrekowitsch, Helmut; Pirker, Armin (2013): Recycling von Reststoffen aus der Aluminiumsekundärmetallurgie. In: *Berg- Hüttenmänn. Mon.h.* 158 (3), S. 91–96. DOI: 10.1007/s00501-013-0111-6.

Pehlken, Alexandra; Albers, Henning; Germer, Frauke (Hg.) (2017): Recycling und Rohstoffe. Rotorblätter aus Windkraftanlagen – Herausforderungen für das Recycling –. Unter Mitarbeit von K. J. Thome-Kozmiensky und Daniel Goldmann. Neuruppin: TK (10).

Pender, K.; Yang, L. (2017): Investigation of the potential for catalysed thermal recycling in glass fibre reinforced polymer composites by using metal oxides. In: *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.* 100 (8), S. 285–293. DOI: 10.1016/j.compositesa.2017.05.016.

Pender, Kyle; Yang, Liu (2019): Investigation of catalyzed thermal recycling for glass fiber-reinforced epoxy using fluidized bed process. In: *Polym. Compos.* 40 (9), S. 3510–3519. DOI: 10.1002/pc.25213.

Pereg, José Ramón Muro; de la Hoz (2013): Life cycle assessment of 1 kWh generated by a wind farm Gamesa G90-2.0MW Onshore. Online verfügbar unter https://de.scribd.com/document/323960189/informe-analisis-ciclo-de-vida-g90-pdf (Spanish version), zuletzt geprüft am 08.02.2021.

Perloff (2018): Microeconomics, Global Edition. 8. Auflage. Harlow: Pearson Education, Limited.

Pestalozzi, Samuel Fadri (2020): Selektive Elektrodynamische Fragmentierung - Zerkleinerungsmechanismen und Einsatzmöglichkeiten zur Rückgewinnung von Wertstoffen. Universität Stuttgart, Stuttgart. Institut für Grenzflächenverfahrenstechnik und Plasmatechnologie der Universität Stuttgart.

Petersen, Frank (2014): Kommentar zu §3. In: Hans D. Jarass und Frank Petersen: Kreislaufwirtschaftsgesetz. KrWG. München: C.H. Beck.

Petersen, Frank; Friedrich, Heike (2021): Novellierung des KrWG 2020. In: *NVwZ*, S. 1–10.

Pickering, S. J. (2006): Recycling technologies for thermoset composite materials — current status. In: *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.* 37 (8), S. 1206–1215. DOI: 10.1016/j.compositesa.2005.05.030.

Pickering, S. J.; Kelly, R. M.; Kennerly, J. R.; Rudd, C. D.; Fenwick, N. J. (2000): A fuidised-bed process for the recovery of glass fbres from scrap thermoset composites. In: *Compos Sci. Technol.* 60, 509-523. Online verfügbar unter https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0266353899001542?via%3Dihub, zuletzt geprüft am 24.11.2021.

Pickering, S. J.; Turner, T.A; Meng, F.; Morris, C. N.; Heil, J. P.; Wong, K. H.; Melendi-Espina, S. (2015): Developments in the fluidised bed process for fibre recovery from thermoset composites. In: 2nd Annual Composites and Advanced Materials. CAMX 2015. Dallas, 26.-29. Oktober 2015.

Pico, Davide; Steinmann, Wilhelm (2016): Synthetic Fibres for Composite Applications. In: Sohel Rana und Raul Fangueiro (Hg.): Fibrous and Textile Materials for Composite Applications 2016. Singapore: Springer Verlag, Singapore (Textile Science and Clothing Technology), S. 135–170.

Pico, Davide; Wilms, Christian; Seide, Gunnar; Gries, Thomas; Kleinholz, Rudolf; Tiesler, Hartmut (2012): Fibers, 12. Glass Fibers. In: Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry. Heidelberg: Wiley-VCH Verlag, S. 1–24.

Pimenta, Soraia; Pinho, Silvestre T. (2011): Recycling carbon fibre reinforced polymers for structural applications: technology review and market outlook. In: *Waste Manag.* 31 (2), S. 378–392. DOI: 10.1016/j.wasman.2010.09.019.

Pinakattu, Fatemeh; Weißgerber, Annemarie (2021): Recycling von Rotorblättern, 11.05.2021. Präsentation an Bastian Brenken und Manuela Wexler.

plasticker (Hg.) (2016): Covestro: Erstes Polyurethan-Rotorblatt in Asien produziert - Effizientere Herstellung von Windkraftanlagen. Online verfügbar unter http://plasticker.de/news/shownews.php?nr=27703&nlid=48718, zuletzt geprüft am 20.10.2020.

PlasticsEurope (2020): Plastics - the Facts 2020. Online verfügbar unter www.plasticseurope.org/de/resources/publications/4312-plastics-facts-2020, zuletzt geprüft am 21.10.2021.

Plitzko, S. (2018): Anwendungssichere Nanokohlenstoffe. Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA), 21.03.2018.

Posselt, Joachim Georg (2019): Entwicklung eines Berechnungsmodells zur thermisch-geometrischen Dimensionierung eines Druck-Wirbelschicht-Verdampfungstrockners mit Tauchheizflächen am Beispiel polydisperser Braunkohle. Dissertation. Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus-Senftenberg, Cottbus. Fakultät für Maschinenbau, Elektro- und Energiesysteme. Online verfügbar unter https://opus4.kobv.de/opus4-btu/frontdoor/deliver/index/docId/4706/file/Posselt_Joachim.pdf, zuletzt geprüft am 08.04.2020.

Potrykus, Alexander; Zotz, Ferdinand; Aigner, Joachim Felix; Weißenbacher, Jakob; Burgstaller, Maria; Abraham, Veronika et al.: Prüfung möglicher Ansätze zur Stärkung des Recyclings, zur Schaffung von Anreizen zur Verwendung recycelbarer Materialien und zur verursachergerechten Zuordnung von Entsorgungskosten im Bereich der Bauprodukte. Hg. v. Umweltbundesamt (UBA) (TEXTE, 05/2021).

Pott, Friedrich (1994): Asbestos use and carcinogenity in Germany and a comparison with animal studies. In: *Ann. Occup. Hyg.* 38 (4), S. 589–600. Online verfügbar unter DOI: 10.1093/annhyg/38.4.589, zuletzt geprüft am 30.09.2019.

Pott, Friedrich; Roller, Markus (2003): Untersuchungen zur Kanzerogenität granulärer Stäube an Ratten - Ergebnisse und Interpretation. Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA). Dortmund (Kurzbericht über das Projekt F1843 des Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin).

Prelle, Rebecca (2010): Abfallrechtliche Produktverantwortung. In: *ZUR*, S. 512–520.

Prelle, Rebecca (2019): Kommentierung zu § 23 KrWG. In: Arndt Schmehl und Jan Henrik Klement: GK-KrWG. Gemeinschaftskommentar zum Kreislaufwirtschaftsgesetz. Hürth: Carl Heymanns.

Prissok, Frank; Hebette, Christophe (2012): Schäume und Kernwerkstoffe für Rotorblätter. In: *Fachmagazin für die Polyurethanindustrie* (FAPU 74, 09-10 2012). Online verfügbar unter https://www.fapu.de/index.php/de/fachartikel/fapu-74-09-10-2012/sch%C3%A4ume-und-kernwerkstoffe-f%C3%BCr-rotorbl%C3%A4tter, zuletzt geprüft am 14.02.2022.

Pyrum Innovations AG (Hg.) (2021): Infinity. Hochleistungsfähige Tapes aus recycelten Carbonfasern für den Leichtbau - CO_2-Reduktion durch hochwertige Recyclingprozesse und -materialien. Online verfügbar unter https://www.pyrum.net/forschung/infinity/, zuletzt geprüft am 06.09.2021.

Qin, Chao; Mulroney, Alan T.; Gupta, Mool C. (2020): Anti-icing epoxy resin surface modified by spray coating of PTFE Teflon particles for wind turbine blades. In: *Materials Today Communications* 22 (10), S. 100770. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2019.100770.

Quicker, Peter; Stockschläder, Jan; Stapf, Dieter; Baumann, Werner; Wexler, Manuela; Beckmann, Michael et al. (2021): Möglichkeiten und Grenzen der Entsorgung carbonfaserverstärkter Kunststoffabfälle in thermischen Prozessen. Abschlussbericht. Forschungskennzahl 3716 34 318 0, FB000393. Hg. v. Umweltbundesamt (UBA). Berlin (TEXTE, 131/2021), zuletzt geprüft am 08.10.2021.

Rademacker, Tim (2021): Experteninterview zur CFK-Pyrolyse der MCAM GmbH am Standort Wischhafen. Online, 16.06.2021. Mündliche Mitteilung an Werner Baumann, Manuela Wexler, Michael Zeller, Simon Steffl, Peter Brantsch und Bastian Brenken. Zoom.

Rademacker, Tim; Alberts, Heinrich (2014): Kohlenstofffaserpellet-Herstellungsverfahren am 03.02.2014. Anmeldenr: 14153636. Veröffentlichungsnr: EP 2 902 433 B1.

Rademacker, Tim; Fette, Marc; Jüptner, Günter (2018): Nachhaltiger Einsatz von Carbonfasern dank CFK-Recycling. In: *Lightweight Des.* 11 (5), S. 12–19. DOI: 10.1007/s35725-018-0046-7.

Rani, Manjeet; Choudhary, Priyanka; Krishnan, Venkata; Zafar, Sunny (2021): A review on recycling and reuse methods for carbon fiber/glass fiber composites waste from wind turbine blades. In: *Composites Part B: Engineering* 215, S. 108768. DOI: 10.1016/j.compositesb.2021.108768.

Rapp Instruments (Hg.) (2008): Marx-Generator. Online verfügbar unter https://www.rapp-instruments.de/diverse/marxgenerator/marxgenerator.htm, zuletzt aktualisiert am 09.03.2008, zuletzt geprüft am 19.10.2021.

Ravey, M.; Pearce, Eli M. (1997): Flexible polyurethane foam. I. Thermal decomposition of a polyether-based, water-blown commercial type of flexible polyurethane foam. In: *J. Appl. Polym. Sci.* 63 (1), S. 47–74. DOI: 10.1002/(SICI)1097-4628(19970103)63:1<47::AID-APP7>3.0.CO;2-S.

Reciclalia (Hg.) (2021a): A new life for composite materials. Online verfügbar unter https://reciclaliacomposite.com/crs-composite-recycled-system/, zuletzt geprüft am 22.07.2021.

Reciclalia (Hg.) (2021b): Our recycled fibers. Online verfügbar unter https://reciclaliacomposite.com/products/, zuletzt geprüft am 22.07.2021.

Rectanus, Christopher (2009): Genehmigungsrechtliche Fragen der Windenergieanlagen-Sicherheit. In: *NVwZ*, S. 871–876.

RECYCLING magazin (Hg.) (2018): Stahlrecyclingunternehmen: Carbonfasern in Shredderfraktionen nicht verwertbar. Online verfügbar unter https://www.recyclingmagazin.de/2018/03/06/stahlrecyclingunternehmen-carbonfasern-in-shredderfraktionen-nicht-verwertbar/, zuletzt aktualisiert am 06.03.2018, zuletzt geprüft am 10.09.2021.

RecyclingPortal (Hg.) (2021): Die weltweit erste thermokatalytische Entgasungsanlage für CFK-Abfälle. Online verfügbar unter https://recyclingportal.eu/Archive/67488, zuletzt aktualisiert am 25.08.2021, zuletzt geprüft am 06.10.2021.

Reese, Moritz (2014): Kommentierung zu § 7 KrWG. In: Hans D. Jarass und Frank Petersen: Kreislaufwirtschaftsgesetz. KrWG. München: C.H. Beck.

Refratechnik Holding GmbH (2021a): Kalzinatoren. Online verfügbar unter https://www.refra.com/de/Kalzinatoren/, zuletzt geprüft am 20.10.2021.

Refratechnik Holding GmbH (2021b): Wärmetauscher. Online verfügbar unter https://www.refra.com/de/Waermetauscher/, zuletzt geprüft am 20.10.2021.

Reh, Lothar (1962): Das Wirbeln von körnigem Gut im schlanken Diffusor als Grenzzustand zwischen Wirbelschicht und pneumatischer Förderung. Karlsruhe: Technische Hochschule Karlsruhe.

Rehbein, Johannes (2017): Blitzschutz mit multifunktionalen CFK-Werkstoffen. Lightning strike protection through multifunctional CFRP materials. In: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR), Institut für Faserverbundleichtbau und Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik (Hg.): Innovationsbericht 2017. Unter Mitarbeit von Martin Wiedemann, Jana Hoidis, Peter Wierach, Christin Herrmann und Jörg Melcher. Braunschweig, S. 28–29. Online verfügbar unter https://www.dlr.de/fa/Portaldata/17/Resources/dokumente/publikationen/innovationsberichte/DLR_FA_Innoberichtericht_2017.pdf, zuletzt geprüft am 14.07.2022.

Rehbinder, Eckard (2018): Ziele, Grundsätze, Strategien und Instrumente. In: Eckard Rehbinder und Alexander Schink (Hg.): Grundzüge des Umweltrechts: Erich Schmidt Verlag, S. 145–309.

Rehbinder, Eckard (2020): § 2 UmweltHG: Landmann / Rohmer. Umweltrecht: UmweltR. Loseblatt-Kommentar zum Umweltrecht. München: C.H. Beck.

Reidt, Olaf; Schindler, Gernot (2019): Kommentierung zu § 9 UIG: Landmann / Rohmer. Umweltrecht: UmweltR. Loseblatt-Kommentar zum Umweltrecht. München: C.H. Beck.

Rieger, Wolfgang (2019): Kommentierung zu § 35 BauGB. In: Schrödter: Baugesetzbuch: BauBG.

Rimmel, Oliver; May, David; Goergen, Christian; Poeppel, Artur; Mitschang, Peter (2019): Development and validation of recycled carbon fiber-based binder tapes for automated tape laying processes. In: *J. Compos. Mater.* 53 (23), S. 3257–3268. DOI: 10.1177/0021998318820422.

Röhr, Caroline (2018): Gewinnungsverfahren: Kupfer. Vorlesung: Anorganische Chemie 2, Metalle. Universität Freiburg. Freiburg, 2018. Online verfügbar unter http://ruby.chemie.uni-freiburg.de/Vorlesung/Seminare/cu_gewinnung_metalle.pdf, zuletzt geprüft am 16.04.21.

Roßnagel, Alexander (2019): Kommentierung zu § 5 BImSchG. In: Martin Führ: GK-BImSchG. Gemeinschaftskommentar zum Bundes-Immissionsschutzgesetz. Hürth: Carl Heymanns.

ROTH&EFFINGER GmbH (Hg.) (2021): Wasserstrahlschneiden. Online verfügbar unter https://www.roth-effinger.de/wasserstrahlschneiden/.

Rouholamin, D.; Shyng, Y. T.; Savage, L.; Ghita, O. (2014): A comparative study into mechanical performance of glass fiber recovered through mechanical grinding and high voltage pulse power fragmentation. Unter Mitarbeit von European Society for Composite Materials (ESCM). In: European Society for Composite Materials (ESCM) (Hg.): ECCM16 - 16th European Conference on Composite Materials, Bd. 16. ECCM16 - 16th European Conference on Composite Materials. Seville, 22.-26. Juni 2014.

Roux, Maxime; Eguemann, Nicolas; Giger, Lian; Dransfeld, Clemens (2013): High Performance Thermoplastic Composite Processing and Recycling from Cradle to Cradle. In: SAMPE Europe (Hg.): Advanced Composites on Its Way to Industrialization. 34th SAMPE Europe International Technical Conference & Forum 2013 (SEICO 13). Paris, 11.-12. März 2013. New York: Curran Associates, Inc., S. 145–150. Online verfügbar unter https://www.researchgate.net/publication/239521864.

Roux, Maxime; Eguémann, Nicolas; Dransfeld, Clemens; Thiébaud, Frédéric; Perreux, Dominique (2017): Thermoplastic carbon fibre-reinforced polymer recycling with electrodynamical fragmentation: From cradle to cradle. In: *J. Thermoplast. Compos. Mater.* 30 (3), S. 381–403. DOI: 10.1177/0892705715599431.

Rumpf, Hans (1975): Mechanische Verfahrenstechnik. München, Wien: Hanser.

Rybicka, Justyna; Tiwari, Ashutosh; Leeke, Gary A. (2016): Technology readiness level assessment of composites recycling technologies. In: *J. Clean Prod.* 112, S. 1001–1012. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.08.104.

Sareen, Agrim; Sapre, Chinmay A.; Selig, Michael S. (2014): Effects of leading edge erosion on wind turbine blade performance. In: *Wind Energ.* 17 (10), S. 1531–1542. DOI: 10.1002/we.1649.

Sarrafi, Aral; Mao, Zhu; Niezrecki, Christopher; Poozesh, Peyman (2018): Vibration-based damage detection in wind turbine blades using Phase-based Motion Estimation and motion magnification. In: *Journal of Sound and Vibration* 421 (B), S. 300–318. DOI: 10.1016/j.jsv.2018.01.050.

Sathishkumar, T. P.; Satheeshkumar, S.; Naveen, J. (2014): Glass fiber-reinforced polymer composites – a review. In: *J. Reinf. Plast. Compos.* 33 (13), S. 1258–1275. DOI: 10.1177/0731684414530790.

Sauer, M.; Kühnel, M.; Witten, E. (2018): Composites-Marktbericht 2018. Marktentwicklungen, Trends, Ausblicke und Herausforderungen. Hg. v. AVK - Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe e. V. (AVK) und Carbon Composites (CCeV). Online verfügbar unter https://www.carbon-composites.eu/media/3575/ger_cc-cf-marktbericht_2018.pdf, zuletzt geprüft am 31.08.2020.

Saurer, Johannes (2016): Rechtswirkungen der Windenergieerlasse der deutschen Bundesländer. In: *NVwZ* 35 (4).

Savov, Luben; Volkova, Elena; Janke, Dieter (2003): Copper and Tin in Steel Scrap Recycling. In: *Mater. Geoenviron.* (Vol. 50, No. 3), S. 627–641.

Schaffarczyk, Alois (Hg.) (2012): Einführung in die Windenergietechnik. Kompetenzzentrum Windenergie Schleswig-Holstein. München: Carl Hanser Verlag. Online verfügbar unter http://www.vlb.de/GetBlob.aspx?strDisposition=a&strIsbn=9783446430327.

Schamel, Elisabeth; Wehnert, Gerd; Schlachter, Herbert; Söthje, Dominik (2021): Chemical Recycling of Carbon Fiber Reinforced Epoxy Composites Using Mild Conditions. In: *Chem. Ing. Tech.* 93 (10), S. 1619–1628. DOI: 10.1002/cite.202100048.

Schink, Alexander (2016): §§ 1, 5 KrWG. In: Alexander Schink, Andrea Versteyl, Martin Dippel, Andrea Garrelmann, Moritz Grunow, Peter Kersandt et al.: KrWG. Kommentar zum Kreislaufwirtschaftsgesetz. 2. Auflage. Berlin, Brüssel: Der juristische Verlag Lexxion.

Schinner, G.; Brandt, J.; Richter, H. (1996): Recycling Carbon-Fiber-Reinforced Thermoplastic Composites. In: *J. Thermoplast. Compos. Mater.* 9 (3), S. 239–245. DOI: 10.1177/089270579600900302.

Schlagenhauf, Lukas; Kuo, Yu-Ying; Michel, Silvain; Terrasi, Giovanni; Wang, Jing (2015): Exposure Assessment of a High-energy Tensile Test With Large Carbon Fiber Reinforced Polymer Cables. In: *J. Occup. Environ. Hyg.* 12 (8), D178-83. DOI: 10.1080/15459624.2015.1029614.

Schlichter, S. (2021): Industrielle Recyclingpotenziale für einen ökologisch nachhaltigen Leichtbau. 24. Internationales Dresdener Leichtbausymposium. ITA Augsburg. Dresden, 17.06.2021.

Schlögl, Kai: Stofflich-energetische Verwertung von carbonfaserhaltigen Abfällen in der Pyrometallurgie. Online verfügbar unter https://rwth-aachen.sciebo.de/s/FVoMnhqxwkHWN6w, zuletzt geprüft am 12.03.2021.

Schlummer, Martin (2021): IVV Master-Vorlage. Können Löseverfahren zur Kreislaufwirtschaft von Kompositmaterialien. DECHEMA-Infotag. DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V., 15.11.2021, zuletzt geprüft am 11.02.2022.

Schmidl, Erwin; Hinrichs, Stephan (2010): Method for Disposing of glass-fibre reinforced components am 22.06.2010. Anmeldenr: WO2010AT00228 20100622. Veröffentlichungsnr: WO2010148418 (A1). C04B7/44. Prioriätsdaten: AT20090000960 20090622.

Schmidt-Kötters, Thomas (2019): Kommentierung zu § 5 BImSchG. In: Ludger Giesberts und Michael Reinhardt: Umweltrecht. BImSchG, KrWG, BBodSchG, WHG, BNatSchG. München: C.H. Beck.

Schmitz, B. (2020): Die Rolle von Kupfer als nachhaltiger Werkstoff. In: *Mod. Gebäudetech.*

Schubert, Heinrich (2008): Handbuch der mechanischen Verfahrenstechnik. 1. Aufl., 1. Nachdr. Weinheim: Wiley-VCH. Online verfügbar unter http://site.ebrary.com/lib/alltitles/docDetail.action?docID=10558717.

Schumm, V. (2021): Benchmarkstudie zur Material- und Prozessentwicklung von FVW aus hochorientierten rCF-Vlieshalbzeugen. Masterarbeit. Fraunhofer IGCV & Hochschule Reutlingen, Reutlingen.

Schwarz, Hubert A.; Flachberger, Helmut; Tischner, Gerd (2015): Optimierung des spezifischen Energieeintrages bei der Zerkleinerung von metallischen Verbundstoffen mittels Prallbrecher. In: Karl J. Thomé-Kozmiensky und Daniel Goldmann (Hg.): Recycling und Rohstoffe, Bd. 8. Neuruppin: TK-Verl. (8), S. 551–556.

Schwarzenberg, Lars; Ruß, Sylvia (2016): Die Windenergieerlasse der Länder – Überblick und neue Entwicklungen. In: *ZUR*, S. 278–285.

Seiler, Elisa; Stark, Alexander; Forberger, Jens (2016): Recycling von Textilien aus carbonfaserverstärkten Kunststoff-Bauteilen und deren Produktion. In: *Chem. Ing. Tech.* 88 (4), S. 500–505. DOI: 10.1002/cite.201500033.

Seiler, Elisa; Teipel, Ulrich (2017): Recycling von Kompositbauteilen aus Kunststoffen als Matrixmaterial - ReKomp. Abschlussbericht. Recycling von Kompositbauteilen aus Kunststoffen als Matrixmaterial - ReKomp. Laufzeit: 01.03.2014 – 31.12.2016. Nürnberg. Online verfügbar unter https://www.stmuv.bayern.de/themen/ressourcenschutz/forschung_entwicklung/doc/abschlussberichte/tp9.pdf, zuletzt geprüft am 14.07.2022.

Seiler, Elisa; Teipel, Ulrich (2018): Recycling von polymeren Verbundstrukturen aus Rotorblättern. In: Stephanie Thiel, Elisabeth Thomé-Kozmiensky und Daniel Goldmann (Hg.): Recycling und Rohstoffe. Neuruppin: Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH (11), S. 395–414.

Seiler, Elisa; Urban, Helfried; Teipel, Ulrich (2020): Mikrowellenpyrolyse von carbonfaserhaltigen Kunststoffen als Recyclingoption. In: *Chem. Ing. Tech.* 92 (4), S. 469–475. DOI: 10.1002/cite.201900133.

SGL TECHNOLOGIES GmbH: SIGRAFIL® Fibers.

SGL TECHNOLOGIES GmbH (2018): Sicherheitsdatenblatt SIGRAFIL® Fibers (alle Typen). 1.05. Aufl. Meitingen, zuletzt geprüft am 12.02.2021.

Shibata, Katsuji; Nakagawa, Mitsutoshi (2014): CFRP Recycling Technology Using Depolymerization under Ordinary Pressure. In: *Hitachi Chem. Tech. Rep.* 56, S. 6–11.

Shihavuddin, A. S.M.; Xen, Chiao (2018): DTU - Drone inspection images of wind turbine. Online verfügbar unter https://data.mendeley.com/datasets/hd96prn3nc/1, zuletzt geprüft am 14.07.2022.

Shohag, Md Abu; Ndebele, Taniwa; Okoli, Okenwa (2019): Real-time damage monitoring in trailing edge bondlines of wind turbine blades with triboluminescent sensors. In: *Structural Health Monitoring* 18 (4), S. 1129–1140. DOI: 10.1177/1475921718788861.

Shohag, Md Abu S.; Hammel, Emily C.; Olawale, David O.; Okoli, Okenwa I. (2017): Damage mitigation techniques in wind turbine blades: A review. In: *Wind Engineering* 41 (3), S. 185–210. DOI: 10.1177/0309524X17706862.

Shuaib, Norshah (2016): Energy efficient fibre reinforced composite recycling. Thesis (Ph.D.). University of Manchester, Great Britain. Online verfügbar unter https://www.research.manchester.ac.uk/portal/en/theses/energy-efficient-fibre-reinforced-composite-recycling(554f1670-c818-4c74-9bfc-af3b51317e9b).html.

Shuaib, Norshah Aizat; Mativenga, Paul Tarisai (2016a): Effect of Process Parameters on Mechanical Recycling of Glass Fibre Thermoset Composites. In: *Procedia CIRP* 48, 134???139. DOI: 10.1016/j.procir.2016.03.206.

Shuaib, Norshah Aizat; Mativenga, Paul Tarisai (2016b): Energy demand in mechanical recycling of glass fibre reinforced thermoset plastic composites. In: *J. Clean Prod.* 120, S. 198–206. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.01.070.

Siemens AG (2012): IntegralBlade®. Hg. v. Siemens AG. Online verfügbar unter https://www.siemensgamesa.com/en-int/explore/journal/2021/03/siemens-gamesa-offshore-blades.

Sittig-Behm, Peter (2020): Rückbau von Windenergieanlagen - Kann das bleiben, oder muss das weg? In: *ZNER*, S. 311–316.

Skleničková, Kateřina; Abbrent, Sabina; Halecký, Martin; Kočí, Vladimír; Beneš, Hynek (2020): Biodegradability and ecotoxicity of polyurethane foams: A review. In: *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.*, S. 1–46. DOI: 10.1080/10643389.2020.1818496.

Smith, H. (Hg.) (1994): Human Respiratory Tract Model for Radiological Protection. The International Commission on Radiological Protection. Oxford: Elsevier Science Ltd (ICRP Publication 66, 66).

Söfker, Wilhelm (2019a): Baugesetzbuch. In: Werner Ernst, Willy Zinkahn, Walter Bielenberg und Michael Krautzberger: Baugesetzbuch. München: C.H. Beck.

Söfker, Wilhelm (2019b): Kommentierung zu § 249 BauGB. In: Willy Spannowsky und Michael Uechtritz: Baugesetzbuch: BauGB. München: C.H. Beck.

Sommer, Karl; Heinz, Rudolf; Schöfer, Jörg (2010): Verschleiß metallischer Werkstoffe. Erscheinungsformen sicher beurteilen ; mit zahlreichen Tabellen. 1. Aufl. Wiesbaden: Vieweg + Teubner (Praxis Werkzeugtechnik). Online verfügbar unter http://deposit.d-nb.de/cgi-bin/dokserv?id=2906140&prov=M&dok_var=1&dok_ext=htm.

Sommer, Valentin; Stockschläder, Jan; Walther, Grit (2020): Estimation of glass and carbon fiber reinforced plastic waste from end-of-life rotor blades of wind power plants within the European Union. In: *Waste management (New York, N.Y.)* 115, S. 83–94. DOI: 10.1016/j.wasman.2020.06.043.

Sommer, Valentin; Walther, Grit (2021): Recycling and recovery infrastructures for glass and carbon fiber reinforced plastic waste from wind energy industry: A European case study. In: *Waste management (New York, N.Y.)* 121, S. 265–275. DOI: 10.1016/j.wasman.2020.12.021.

Sondermann, Wolf Dieter; Hejma, Birgit (2005): Kommentar. In: Ludger-Anselm Versteyl und Wolf Dieter Sondermann (Hg.): BBodSchG. Bundes-Bodenschutzgesetz. (Gelbe Erläuterungsbücher). München: C.H. Beck.

Song, Young S.; Youn, Jae R.; Gutowski, Timothy G. (2009): Life cycle energy analysis of fiber-reinforced composites. In: *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.* 40 (8), S. 1257–1265. DOI: 10.1016/j.compositesa.2009.05.020.

Ständige Senatskommission zur Prüfung gesundheitsschädlicher Arbeitsstoffe (2021): MAK- und BAT-Werte-Liste 2021. Hg. v. Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) (Mitteilung, 51), zuletzt geprüft am 22.02.2022.

Stapf, Dieter; Seifert, Helmut; Wexler, Manuela: Thermische Verfahren zur rohstofflichen Verwertung kunststoffhaltiger Abfälle.

Steinacker, S.; Rumpold, R.; Antrekowitsch, J. (2015): Behandlung und Verwertung der Reststoffe aus der Kupfer-Metallurgie. In: K. J. Thome-Kozmiensky (Hg.): Mineralische Nebenprodukte und Abfälle. Aschen, Schlacken, Stäube und Baurestmassen, Bd. 2. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky (2), S. 545–559.

Stieß, Matthias (2001): Mechanische Verfahrenstechnik. [Nachdr.]. Berlin, Heidelberg: Springer.

Strauß, Karl (2009): Kraftwerkstechnik. zur Nutzung fossiler, nuklearer und regenerativer Energiequellen. 6., aktualisierte Auflage. Berlin Heidelberg: Springer.

Suzuki, Tetsuya; Takahashi, Jun (2005): Prediciton of energy intensity of carbon fibre reinforced plastics for mass-produced passenger cars.

Tadini, Pietro; Grange, Nathan; Chetehouna, Khaled; Gascoin, Nicolas; Senave, Samuel; Reynaud, Isabelle (2017): Thermal degradation analysis of innovative PEKK-based carbon composites for high-temperature aeronautical components. In: *Aerosp. Sci. Technol.* 65, S. 106–116. DOI: 10.1016/j.ast.2017.02.011.

Teijin Carbon Europe GmbH: Teijin Tenax short fibers, zuletzt geprüft am 21.02.2022.

Teknos (Hg.): Rotorblattbeschichtung - TEKNODUR 3572 Hochleistungsfarbsystem für Rotorblätter. Online verfügbar unter https://www.teknos.com/de-DE/industrielle-beschichtungen/loesungen/energieindustrie/windenergieanlagen/herstellung-von-windenergieanlagen/rotorblatter-von-windenergieanlagen/#blade, zuletzt geprüft am 20.10.2021.

Teknos (Hg.): TEKNODUR 3572-09. Online verfügbar unter https://www.teknos.com/de-DE/produkte/teknodur-3572-09/, zuletzt geprüft am 20.10.2021.

Tesar, Maria; Öhlinger, Andreas (2009): Elektroaltgerätebehandlung in Österreich. Zustandsbericht. Wien: Umweltbundesamt.

Teschner, Roman (2019): Glasfasern. 2. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, zuletzt geprüft am 08.12.2020.

The Wind Power (Hg.) (2021): Wind energy database. Online verfügbar unter https://www.thewindpower.net/, zuletzt aktualisiert am 18.07.2022.000Z, zuletzt geprüft am 18.07.2022.709Z.

Thomas Drewes-Lojewski: Arrangement for dividing bulky bulky goods containing fiber composite material. Angemeldet durch Hanseatic Rohr GmbH. Anmeldenr: DE102015219412.4A. Veröffentlichungsnr: DE102015219412A1.

Thome-Kozmiensky, K. J. (Hg.) (2015): Mineralische Nebenprodukte und Abfälle. Aschen, Schlacken, Stäube und Baurestmassen. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky (2).

Thomson, S. A.; Hilaski, R. J.; Wright, R.; Mattie, D. (1990): Nonrespirability of Carbon Fibres in rats from repeated inhalation exposure. Chemical Research, Development and Engineering Center (CDREC). Maryland, USA (CERDEC-TR, 149), zuletzt geprüft am 20.10.2020.

Thor, M.; Mandel, U.; Nagler, M.; Maier, F.; Tauchner, J.; Sause, M. G. R.; Hinterhölzl, R. M. (2021): Numerical and experimental investigation of out-of-plane fiber waviness on the mechanical properties of composite materials. In: *Int J Mater Form* 14 (1), S. 19–37. DOI: 10.1007/s12289-020-01540-5.

Tikana, Ladji; Schmitz, B. (2020): Recycling entscheidet über Ökobilanz beim Bauen. Kupfer komplett wiederverwendbar. Hg. v. Deutsches Kupferinstitut. Düsseldorf. Online verfügbar unter https://www.kupferinstitut.de/wp-content/uploads/2020/04/FA_Recycling-entscheidet-%C3%BCber-%C3%96kobilanz-beim-Bauen.pdf, zuletzt geprüft am 09.02.21.

Trezek, George J. (1977): Significance of Size Reduction in Solid Waste Management. Grant Number R804034. Hg. v. Environmental Protection Agency. Ohio (EPA-600-2-77-131). Online verfügbar unter https://nepis.epa.gov/Exe/ZyNET.exe/9101BHES.TXT?ZyActionD=ZyDocument&Client=EPA&Index=1976+Thru+1980&Docs=&Query=&Time=&EndTime=&SearchMethod=1&TocRestrict=n&Toc=&TocEntry=&QField=&QFieldYear=&QFieldMonth=&QFieldDay=&IntQFieldOp=0&ExtQFieldOp=0&XmlQuery=&File=D%3A%5Czyfiles%5CIndex%20Data%5C76thru80%5CTxt%5C00000027%5C9101BHES.txt&User=ANONYMOUS&Password=anonymous&SortMethod=h%7C-&MaximumDocuments=1&FuzzyDegree=0&ImageQuality=r75g8/r75g8/x150y150g16/i425&Display=hpfr&DefSeekPage=x&SearchBack=ZyActionL&Back=ZyActionS&BackDesc=Results%20page&MaximumPages=1&ZyEntry=1&SeekPage=x&ZyPURL, zuletzt geprüft am 06.06.2021.

Trippe, Frederik (2013): Techno-ökonomische Bewertung alternativer Verfahrenskonfigurationen zur Herstellung von Biomass-to-Liquid (BtL) Kraftstoffen und Chemikalien. Dissertation. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.

TU Bergakademie Freiberg (2021a): Alternative Fasermaterialien auf Basis von Cu-Schlacken - Kupferschlacken zu Glasfasern -. Online verfügbar unter https://tu-freiberg.de/igt/jerg/forschung/projekte, zuletzt geprüft am 19.10.2021.

TU Bergakademie Freiberg (2021b): Kupferschlacke für Stahl- und Glasindustrie nutzbar machen. Online verfügbar unter https://tu-freiberg.de/presse/kupferschlacke-fuer-stahl-und-glasindustrie-nutzbar-machen, zuletzt geprüft am 19.10.2021.

TU Bergakademie Freiberg (2021c): MVT 3: Zerkleinerungsfortschritt. Online verfügbar unter https://video.tu-freiberg.de/video/MVT-3-Zerkleinerungsfortschritt/989caa30e7bd39691e51377c7f6cbab4, zuletzt geprüft am 20.10.2021.

Tünnesen-Harmes, Christian (2014): Kommentierung zu § 23 KrWG. In: Hans D. Jarass und Frank Petersen: Kreislaufwirtschaftsgesetz. KrWG. München: C.H. Beck.

TYROLIT Hydrostress AG (Hg.) (2009): Operating Instructions SB wire saw. Index 001. Online verfügbar unter https://www.tyrolit.de/fileadmin/Documents/Construction/Manuals/SB/Index_001/SB_001_en.pdf.

Umweltbundesamt (UBA) (2012): Merkblatt über die Besten Verfügbaren Techniken in der Eisen- und Stahlerzeugung. nach der Industrie-Emissionen-Richtlinie 2010/75/EU. Hg. v. Umweltbundesamt (UBA). Umweltbundesamt (UBA). Berlin. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/367/dokumente/bvt-merkblatt_eisen-_und_stahlerzeugung_endfassung.pdf, zuletzt geprüft am 01.02.21.

United States Environmetal Protection Agency (EPA) (Hg.) (1982): Carbon Fiber Data Base: Data Base Review and Assessment of Carbon Fiber Release into the Environment. Project Summary. EPA 600/2-82-038. Online verfügbar unter https://nepis.epa.gov/Exe/ZyNET.exe/2000TS2D.TXT?ZyActionD=ZyDocument&Client=EPA&Index=1981+Thru+1985&Docs=&Query=&Time=&EndTime=&SearchMethod=1&TocRestrict=n&Toc=&TocEntry=&QField=&QFieldYear=&QFieldMonth=&QFieldDay=&IntQFieldOp=0&ExtQFieldOp=0&XmlQuery=&File=D%

3A%5Czyfiles%5CIndex%20Data%5C81thru85%5CTxt%5C00000007%5C2000TS2D.txt&User=ANONYMOUS&Password=anonymous&SortMethod=h%7C-&MaximumDocuments=1&FuzzyDegree=0&ImageQuality=r75g8/r75g8/x150y150g16/i425&Display=hpfr&DefSeekPage=x&SearchBack=ZyActionL&Back=ZyActionS&BackDesc=Results%20page&MaximumPages=1&ZyEntry=1&SeekPage=x&ZyPURL#, zuletzt geprüft am 10.09.2021.

Vallendar, Willy (1991): Die Betriebseinstellung - ein neuer Regelungstatbestand des BImSchG. In: *UPR*, S. 91–96.

van der Bos, Roelant (2011): Rotorblattverbindung für eine Windturbine. Angemeldet durch GEN ELECTRIC [US] am 19.08.2011. Anmeldenr: DE20111052841 20110819. Veröffentlichungsnr: DE102011052841 (A1). F03D1/06. Prioriätsdaten: US20100859585 20100819.

Vartega Inc (Hg.) (2021): We are Vartega. Making carbon fiber more accessible. Online verfügbar unter https://www.vartega.com/, zuletzt geprüft am 20.10.2021.

Velikorodov, Viktor (2009): Der Einfluss der Entstaubung auf den spezifischen elektrischen Energieeinsatz des Lichtbogenofens. Dissertation. RWTH Aachen, Aachen. Institut für Industrieofenbau und Wärmetechnik.

Verband Deutscher Metallhändler e.V. (Hg.) (2012): Usancen und Klassifizierungen des Metallhandels. UKM 2002/1988 – Neudruck 2012. 3. Aufl. Online verfügbar unter http://www.vdm.berlin/resources/08_Medien/Usancen%20und%20Klassifizierungen%202012.pdf, zuletzt geprüft am 24.03.2021.

BauNVO, vom 21.11.2017 (26.06.1962): Verordnung über die bauliche Nutzung der Grundstücke, S. 12–55. Online verfügbar unter https://www.gesetze-im-internet.de/baunvo/, zuletzt geprüft am 20.07.2022.

Versteyl, Andrea; Grunow, Moritz (2018): Öffentlich-rechtliche und zivilrechtliche Haftung bei der Entsorgung von Bau- und Abbruchabfällen. Risikominimierung durch Vertragsgestaltung im Verhältnis zwischen Bauherr und Entsorger. In: *AbfallR*.

Versteyl, Ludger-Anselm (2007): Zur Verantwortlichkeit des Abfallerzeugers-besitzers. Vorläufiges oder Endgültiges? In: *NVwZ* 26 (10).

Vo Dong, Phuong Anh; Azzaro-Pantel, Catherine; Cadene, Anne-Laure (2018): Economic and environmental assessment of recovery and disposal pathways for CFRP waste management. In: *Resour. Conserv. Recycl.* 133, S. 63–75. DOI: 10.1016/j.resconrec.2018.01.024.

Vohr, Hans-Werner (2012): Toxikologie. Hoboken: John Wiley & Sons, zuletzt geprüft am 05.03.2020.

Wahlhäuser, Jens (2021): Räumliche Strategien in der Energie- und Verkehrswende aus Sicht des Bundesministeriums des Innern, für Bau und Heimat (BMI). In: *ZUR* 32 (1).

Walter, Juergen; Brodesser, Alexander; Hustedt, Michael; Bluemel, Sven; Jaeschke, Peter; Kaierle, Stefan (2016): Laser Processing of Carbon Fiber Reinforced Plastics – Release of Carbon Fiber Segments During Short-pulsed Laser Processing of CFRP. In: *Phys. Procedia* 83, S. 1021–1030. DOI: 10.1016/j.phpro.2016.08.107.

Walter, Tobias (2017): CFK-Abfall als Rohstoff in der Calciumcarbidproduktion. Verwertung von CFK-haltigen Abfällen. Umweltcluster Bayern; MAI Carbon. Augsburg, 28.09.2017.

Walter, Tobias (2019): CFK-Einsatz in der Calciumcarbidproduktion. Aufbereitung und Verwertung carbonfaserhaltiger Abfälle. Umweltbundesmant. Dessau, 20.09.2019. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/421/dokumente/2.1.3_walter.pdf, zuletzt geprüft am 07.04.2021.

Walter, Tobias (2021): Experteninterview zum Einsatz aufbereiteter carbonfaserhaltiger Abfälle bei der Calciumcardbid-Herstellung der Firma AlzChem. Online, 10.08.2021. Mündliche Mitteilung an Manuela Wexler. MS Teams.

Walter, Tobias; Oberbauer, Josef; Salzinger, Josef; Putz, Sebastian (2017): Verfahren zur Wiederverwertung von Carbonfaser-haltigen Kunststoffen. Angemeldet durch AlzChem Trostberg GmbH am 25.09.2017. Anmeldenr: 102017122167. Veröffentlichungsnr: DE 10 2017 122 167 B3. C01B 32/942.

Wang, Jing; Schlagenhauf, Lukas; Setyan, Ari (2017): Transformation of the released asbestos, carbon fibers and carbon nanotubes from composite materials and the changes of their potential health impacts. In: *J. Nanobiotechnol.* 15 (1), S. 15. DOI: 10.1186/s12951-017-0248-7.

Warheit, D. B.; Hansen, J. F.; Carakostas, M. C.; Hartsky, M. A. (1994): Acute inhalation toxicity studies in rats with a repsirable-sized experimental carbon fibre: pulmonary biochemical and cellular effects. In: *Ann. Occup. Hyg.* (38), S. 769–776, zuletzt geprüft am 29.10.2020.

Waritz, R. S.; Collins, C. J.; Ballantyne, B.; and Clary, J. J. (1990): Chronic inhalation of 3 µm diameter carbon fibers. In: *Toxicologist* (10(1)), S. 70, zuletzt geprüft am 11.02.2021.

DIN ISO 10872, Oktober 2012: Wasserbeschaffenheit, zuletzt geprüft am 26.10.2021.

DIN EN ISO 8692, Juni 2012: Wasserbeschaffenheit, zuletzt geprüft am 23.10.2020.

Weaver, Amanda (1992): Recycling in Action. In: *Reinf. Plast.* (2), S. 32–33.

Webersinn, Jürgen (2019): Kommentierung zu § 23 KrWG. In: Alexander Schink und Andrea Versteyl: Kommentar zum Kreislaufwirtschaftsgesetz. 2. Aufl. Berlin: Lexxion Verlagsgesellschaft.

Wegner, Nils (2017): Keine SUP-Pflicht für Windenergieerlasse. Analyse der neueren Rechtsprechung des EuGH zum Anwendungsbereich der SUP-RL mit Blick auf die Windenergieerlasse der Bundesländer. In: *NuR*.

Weh, A. (2015a): High Voltage Pulse Fragmentation Technology to recycle fibre-reinforced composites. Hg. v. Europäische Kommission. SELFRAG AG. Online verfügbar unter https://cordis.europa.eu/project/id/323454/reporting.

Weh, A. (2015b): High Voltage Pulse Fragmentation Technology to recycle fibre-reinforced composites. Diagrams. Hg. v. Europäische Kommission. SELFRAG AG. Online verfügbar unter https://cordis.europa.eu/project/id/323454/reporting.

Weidemann, Clemens (1995): Umweltschutz durch Abfallrecht. Eine kritische Bewertung des neuen Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetzes. In: *NVwZ* 14 (7).

Weißgerber, Franz; Pinakattu, Fatemeh (2020): Experteninterview zur Verwertung von Rotorblattabfällen bei der Firma Carbon-Werke Weißgerber GmbH & Co. KG. Online, 20.11.2020. Mündliche Mitteilung an Christian Kühne, Manuela Wexler, Sonja Mülhopt, Werner Baumann, Rebekka Volk und Bastian Brenken. Zoom.

Westbomke, Martin (2021): Effiziente Gestaltung der Demontage von Windenergieanlagen. IPH Band. Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover. Institut für Integrierte Produktion Hannover gGmbH.

Westphal, Götz; Monsé, Christian; Walter, Dirk; Brüning, Thomas; Bünger, Jürgen (2019a): Gefährdungsanalyse für Carbonfaser-verstärkte Kunststoffe. PICMA-Test weist auf sehr geringe Entzündungswirkungen hin. In: *IPA-J.* (01), S. 10–14, zuletzt geprüft am 29.10.2020.

Westphal, Götz A.; Rosenkranz, Nina; Brik, Alexander; Weber, Daniel; Föhring, Isabell; Monsé, Christian et al. (2019b): Multi-walled carbon nanotubes induce stronger migration of inflammatory cells in vitro than asbestos or granular particles but a similar pattern of inflammatory mediators. In: *Toxicol. In Vitro* 58, S. 215–223. DOI: 10.1016/j.tiv.2019.03.036.

Wexler, Manuela; Baumann, Werner; Beuchle, Günter; Gehrmann, Hans-Joachim; Hauser, Manuela; Merz, Daniela et al. (2020): Potentials and Risks in the Recycling and Recovery of Carbon Fibers. 2nd Advanced Materials Online Conference. Karlsruher Institut für Technologie. Karlsruhe, 15.09.2020. Online verfügbar unter DOI:10.5445/IR/1000124036, zuletzt geprüft am 17.11.2021.

Wexler, Manuela; Baumann, Werner; Doninger, Torsten; Gehrmann, Hans-Joachim; Hagemann, Reiner; Hauser, Manuela et al. (2021): Optionen der Carbonfaserverwertung in industriellen Hochtemperaturprozessen.

Whitlock, Robin (2014): Gamesa launches anti-icing paint for wind turbines. In: *Renewable Energy Magazin*. Online verfügbar unter https://www.renewableenergymagazine.com/wind/gamesa-launches-antiicing-paint-for-wind-turbines-20140424, zuletzt geprüft am 14.07.2022.

wib-blechexperten (Hg.) (2021): Laserschneiden. Online verfügbar unter https://www.wib-blechexperten.de/images/Download/Laserschneiden.pdf, zuletzt geprüft am 05.03.2021.

Wiebe, Gerhard (2019): Der Geschäftsgeheimnisschutz im Informationsfreiheitsrecht. Unter besonderer Berücksichtigung des Gesetzes zum Schutz von Geschäftsgeheimnissen. In: *NVwZ* 38 (23).

Wikipedia (Hg.) (2021a): Holzstoff. Online verfügbar unter https://de.wikipedia.org/w/index.php?oldid=201216316, zuletzt aktualisiert am 05.10.2021, zuletzt geprüft am 20.10.2021.

Wikipedia (Hg.) (2021b): Dielektrische Erwärmung. Online verfügbar unter https://de.wikipedia.org/w/index.php?oldid=189542182, zuletzt aktualisiert am 05.10.2021, zuletzt geprüft am 19.10.2021.

IEC 61400-24:2019, 2019: Wind energy generation systems - Part 24: Lightning protection.

Windbranche.de (2016): Windenergie-Rotorblätter mit BASF-Beschichtung bestehen harte Regenprüfung. Online verfügbar unter https://www.windbranche.de/news/nachrichten/artikel-31474-windenergie-rotorbltter-mit-basf-beschichtung-bestehen-harte-regenprfung, zuletzt geprüft am 20.10.2021.

DIN EN IEC 61400-1 VDE 0127-1, 12.2019: Windenergieanlagen.

WindEurope (2020): Decommissioning of onshore wind turbines. Industry Guidance Document.

Windturbine (Hg.) (2020a): 1x set of blades for Enercon E-40/3 with minor need for overhaul. Online verfügbar unter https://wind-turbine.com/marktplatz/komponenten/rotorblaetter/100439/1x-set-of-blades-for-enercon-e-40-3-with-minor-need-for-overhaul.html, zuletzt geprüft am 10.02.2021.

Windturbine (Hg.) (2020b): for sale 3x blade LM 14.2m-BONUS 300kW. Online verfügbar unter https://wind-turbine.com/marktplatz/komponenten/rotorblaetter/102950/for-sale-3x-blade-lm-14-2m-bonus-300kw.html, zuletzt geprüft am 10.02.2021.

Windturbine (Hg.) (2020c): Marktplatz für Rotorblätter. Online verfügbar unter https://wind-turbine.com/marktplatz/komponenten/rotorblaetter, zuletzt aktualisiert am 15.07.2022.000Z, zuletzt geprüft am 10.02.2021.

Windturbine (Hg.) (2020d): Rotor Blade Model LM 13.4 used. Online verfügbar unter https://wind-turbine.com/marktplatz/komponenten/rotorblaetter/114937/rotor-blade-model-lm-13-4-used.html, zuletzt geprüft am 10.02.2021.

Windturbine (Hg.) (2020e): Verkaufe 9 Rotorblätter aus einem Versicherungsfall. Online verfügbar unter https://wind-turbine.com/marktplatz/komponenten/rotorblaetter/106455/verkaufe-9-rotorblaetter-aus-einem-versicherungsfall.html, zuletzt geprüft am 21.02.2021.

Wirtschaftsvereinigung Stahl (Hg.) (2017): Stahl und Nachhaltigkeit. Eine Bestandsaufnahme in Deutschland. Düsseldorf. Online verfügbar unter https://www.stahl-online.de/wp-content/uploads/2018/03/StahlNachhaltigkeit_2017_web_FINAL.pdf, zuletzt geprüft am 21.01.21.

Wirtschaftsvereinigung Stahl (Hg.) (2018): Perspektiven der Stahlproduktion. in einer treibhausgas-neutralen Wirtschaft. Online verfügbar unter https://www.stahl-online.de/wp-content/uploads/2019/07/WV-Stahl_Perspektiven_Stahlproduktion_2018_rz_Web.pdf, zuletzt geprüft am 21.01.21.

Wirtschaftsvereinigung Stahl (Hg.) (2019): Stahlerzeugung. Online verfügbar unter https://www.stahl-online.de/index.php/themen/stahltechnologie/stahlerzeugung/, zuletzt geprüft am 13.02.19.

Wirtschaftsvereinigung Stahl (Hg.) (2020a): Circular Economy mit Stahl. Beitrag zum Klimaschutz in Europa. Berlin. Online verfügbar unter https://www.stahl-online.de/wp-content/uploads/2020/03/Circular-Economy_2020-rz_WEB.pdf, zuletzt geprüft am 21.01.21.

Wirtschaftsvereinigung Stahl (Hg.) (2020b): Fakten zur Stahlindustrie in Deutschland. Berlin. Online verfügbar unter https://www.stahl-online.de/wp-content/uploads/2020/11/WV-Stahl_Fakten-2020_rz_neu_Web.pdf, zuletzt geprüft am 21.01.21.

Witik, Robert A.; Teuscher, Remy; Michaud, Véronique; Ludwig, Christian; Månson, Jan-Anders E. (2013): Carbon fibre reinforced composite waste: An environmental assessment of recycling, energy recovery and landfilling. In: *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.* 49, S. 89–99. DOI: 10.1016/j.compositesa.2013.02.009.

Witte, T.; Sauer, M.; Barth, T.; Schumm, V. (2021): Hochausgerichtete Textilien aus recycelten C-Fasern für lasttragende Anwendungen. Projektvorstellung. MAI Carbon Projektforum. Augsburg, 13.10.2021.

Witten, Elmar; Mathes, Volker (2020): Der Markt für Glasfaserverstärkte Kunststoffe (GFK) 2020. Marktentwicklungen, Trends, Ausblicke und Herausforderungen. Hg. v. AVK - Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe e. V. (AVK).

Woldt, Dirk (2004): Zerkleinerung nicht-spröder Stoffe in Rotorscheren und -reißern. Freiberg, TU Bergakademie, Diss., 2004. Freiberg <Sachsen>: TU Bergakademie Freiberg Fakultät Maschinenbau Verfahrens- und Energietechnik (Freiberger Dissertationen online, 212). Online verfügbar unter https://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:swb:105-5257457.

Worrel, Ernst; Reuter, M. A. (2014): Handbook of recycling. State-of-the-art for practitioners, analysts, and scientists. Amsterdam, Boston: Elsevier.

WP Systems (Hg.) (2021): Wartungs- und Rückbaulösungen für Windenergieanlagen. Online verfügbar unter https://wpsystems.de/, zuletzt aktualisiert am 19.07.2022.000Z, zuletzt geprüft am 19.07.2022.482Z.

Wuppertal Institut, SKZ (2021): Förderung einer hochwertigen Verwertung von Kunststoffen aus Abbruchabfällen sowie der Stärkung des Rezyklateinsatzes in Bauprodukten im Sinne der europäischen Kunststoffstrategie. Abschlußbericht. Hg. v. Umweltbundesamt (UBA). Berlin (TEXTE, 151/2021). Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2021-11-23_texte_151-2021_rebaupro_0.pdf, zuletzt geprüft am 17.12.2021.

Wüstenberg, D.; Kasper, J. (2004): Required energy and structural breakdown at the process of dynamic cutting—comminution of polypropylene and aluminium. In: *International Journal of Mineral Processing* 74, S417-S424. DOI: 10.1016/j.minpro.2004.07.009.

Xu, Ke; Hu, Jianlin; Jiang, Xingliang; Meng, Wei; Lan, Binhuan; Shu, Lichun (2018): Anti-Icing Performance of Hydrophobic Silicone–Acrylate Resin Coatings on Wind Blades. In: *Coatings* 8 (4), S. 151. DOI: 10.3390/coatings8040151.

Yang, Jie; Liu, Jie; Liu, Wenbin; Wang, Jun; Tang, Tao (2015): Recycling of carbon fibre reinforced epoxy resin composites under various oxygen concentrations in nitrogen–oxygen atmosphere. In: *J. Anal. Appl. Pyrolysis* 112, S. 253–261. DOI: 10.1016/j.jaap.2015.01.017.

Yang, L.; Pender, K. (2020): Regenerating performance of glass fibre recycled from wind turbine blade. In: *Composites Part B: Engineering* 198, S. 108230. DOI: 10.1016/j.compositesb.2020.108230.

Yarbrough, Aaron A. (2017): Shear web for a wind turbine rotor blade. Angemeldet durch GEN ELECTRIC [US] am 08.06.2017. Anmeldenr: US201715617192 20170608. Veröffentlichungsnr: US2018355843 (A1). F03D1/06. Prioriätsdaten: US201715617192 20170608.

Yoder, Tommy; Greene, Ben; Porter, Alan (2015): Carbon structure hazard control. Hg. v. National Aeronautics and Space Administration (NASA) und Johnson Space Center. National Aeronautics and Space Administration (NASA). Las Cruces, zuletzt geprüft am 29.10.2020.

Zamora, Rodriguez Alonso O. (2015): Noise reducing fence for a wind trubine blade. Angemeldet durch SIEMENS AG [DE]; SIEMENS ENERGY INC [US] am 10.09.2015. Anmeldenr: WO2015US49319 20150910. Veröffentlichungsnr: WO2017044099 (A1). F03D1/06. Prioriätsdaten: WO2015US49319 20150910.

Zeller, Michael; Netsch, Niklas; Richter, Frank; Leibold, Hans; Stapf, Dieter (2021): Chemical Recycling of Mixed Plastic Wastes by Pyrolysis – Pilot Scale Investigations. In: *Chem. Ing. Tech.* DOI: 10.1002/cite.202100102.

Zeschmar-Lahr, Barbara; Schönberger, Harald; Waltisberg, Josef (2020): Abfallmitverbrennung in Zementwerken. Sachverständigengutachten. Projektnummer 111391, FB000422. Hg. v. Umweltbundesamt (UBA) (TEXTE, 202/2020). Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/5750/publikationen/2020_11_05_texte_202_2020_abfallverbrennung_zementwerke_1.pdf, zuletzt geprüft am 10.09.2021.

Zhang, Jin; Chevali, Venkata S.; Wang, Hao; Wang, Chun-Hui (2020): Current status of carbon fibre and carbon fibre composites recycling. In: *Compos. B. Eng.* 193, S. 108053. DOI: 10.1016/j.compositesb.2020.108053.

Zhang, Zhongyi; Wang, Xiuling; Lin, Leiguang; Xing, Shudong; Wu, Yonghui; Li, Yao et al. (2001): The Effects of Carbon Fibre and Carbon Fibre Composite Dusts on Bronchoalveolar Lavage Component of Rats. In: *J. Occup. Health* 43 (2), S. 75–79. DOI: 10.1539/joh.43.75.

Zia, Khalid Mahmood; Bhatti, Haq Nawaz; Ahmad Bhatti, Ijaz (2007): Methods for polyurethane and polyurethane composites, recycling and recovery: A review. In: *React. Funct. Polym.* 67 (8), S. 675–692. DOI: 10.1016/j.reactfunctpolym.2007.05.004.

Zogg, Martin (1993): Einführung in die mechanische Verfahrenstechnik. 3., überarb. Aufl. Stuttgart: B.G. Teubner.

Zotz, Ferdinand; Kling, Maximilian; Langner, Florian; Hohrath, Philipp; Born, Hartmut; Feil, Alexander (2019): Entwicklung eines Konzepts und Maßnahmen für einen ressourcensichernden Rückbau von Windenergieanlagen. Abschlußbericht. Hg. v. Umweltbundesamt (UBA). Berlin (TEXTE, 117/2019), zuletzt geprüft am 21.10.2020.

Anhang

A.1 Anhang Kapitel 2

A.1.1 Methodik

Gezielte Internetrecherchen wurden über Google, Google Scholar/Research Gate, STN, Google Patents /LinkedIn und Xing durchgeführt.

Die meistgesuchten Stichworte sind im Folgenden aufgelistet:

- Material/Aufbau und Herstellungsprozess-Recherche:
- Wind turbine blade („ohne“ helicopter)
- Wind turbine blade material composition
- Wind turbine blade weight
- Wind turbine blade foam (“ohne” helicopter)
- Wind rotor blade glass carbon balsa epoxy resin foam (“ohne” helicopter)
- Dependence Balsa Foam length in rotor blade
- Wind turbine blade gelcoat material
- Wind turbine blade paint material
- Wind turbine blade offshore coat
- Offshore rotor blade material special requirements
- Offshore rotor blade material characteristics
- Wind rotor blade maintenance
- Maintenance offshore rotor blade
- Wind rotor blade repair
- Wind rotor blade dismantling
- Wind rotor blade sensor / sensor weigth / sensor materials / sensor material waste
- Wind rotor blade Not destructive quality controls
- Wind rotor blade cross section
- Wind rotor blade root
- Wind rotor blade root connection
- Wind rotor blade offshore harsh condition
- Difference between offshore and inshore wind rotor blade (“ohne” helicopter)

- Rotor blade manufacturing process
- Wartungsfirmen Wind Rotorblätter Wind Anlage
- Wartung Wind Anlage
- Transport Wind Energie Rotor Blatt
- Environment + Name der WEA Hersteller (z. B. Enercon, Vestas, LM Wind Power…)
- LCA + + Name der WEA Hersteller (z. B. Enercon, Vestas, LM Wind Power…)
- Wind rotor blade Repower
- RWE Repower
- Repower statistische Daten in Deutschland
- Wind rotor blade lightning
- Wind rotor blade de-icing

Viele Recherchen wurden ohne detaillierte Kontrollen aller gelieferten Quellen durchgeführt. Google liefert die Ergebnisse mit einer angeordneten Relevanz (von hoher zu niedriger Relevanz), die Quellen wurden gesichtet bis die aufgelisteten Quellen nicht mehr relevant waren (es handelte sich in Abhängigkeit der Suche um 10 bis 100 Quellen).

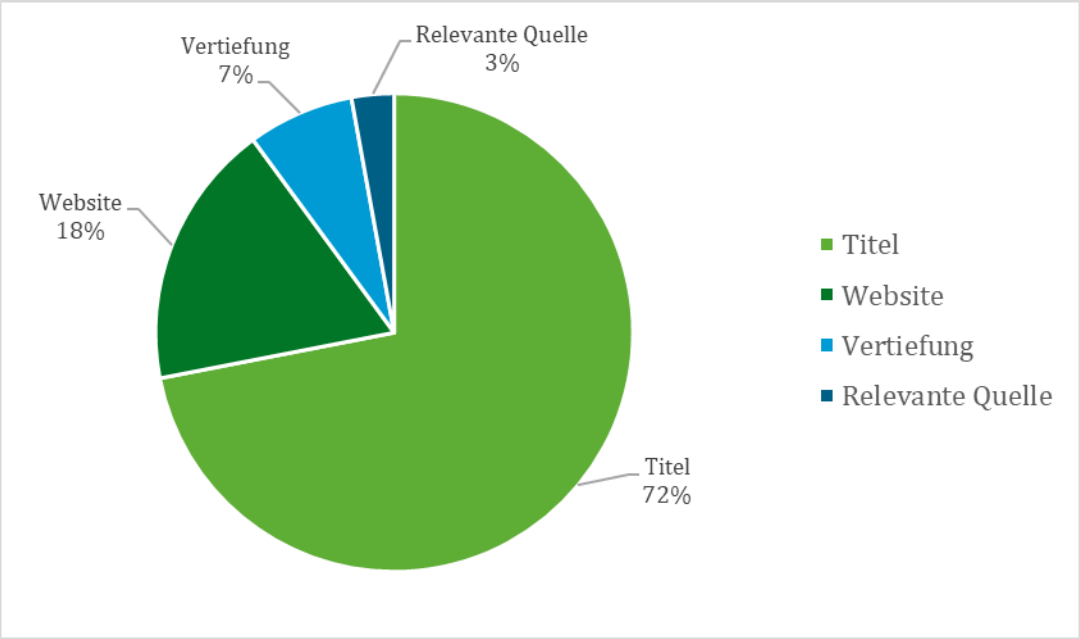
Die Sortierung / Bewertung der Relevanz der Quelle wurde in drei Stufen gegliedert:

a) Relevanz der Titel (auf Google)

b) Relevanz im Abstract oder Relevanz der Webseite

c) Relevanz der enthaltenen Dokumente (Paper oder Report, Berichte, Produkt- und Datenblätter, Präsentationen, Fotos, Kontaktpersonen).

Abbildung 190: Verteilung der Recherche-Ergebnisse.



Quelle: Eigene Darstellung, Fraunhofer-ICT.

Diese Methodik kann nicht als rein tabellarisches Vorgehen betrachtet werden. Erfolgreiche Quellen wurden zusätzlich weiter recherchiert, um Kaskaden-Quellen zu finden. Interne relevante Informationen innerhalb von Webseiten wurden verfolgt, auch wenn sie stark vom recherchierten Kennwort abwichen.

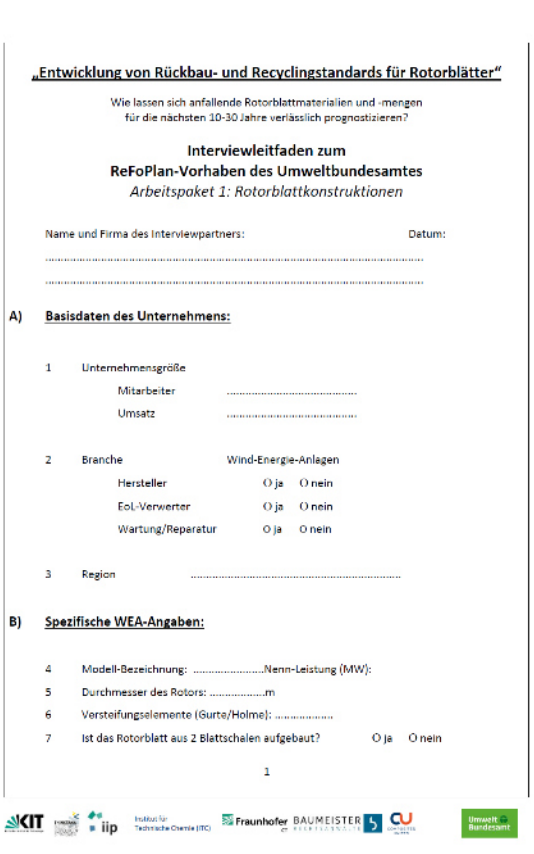
Kontakte mit passendem Ansprechpartner wurden mit dem folgenden Vorgehen identifiziert:

- Direkte persönliche Kontakte (bereits bekannt),
- Kontakte innerhalb eigener Netzwerke (Kontakte über andere identifiziert),
- Gezielte Kontaktanfrage auf LinkedIn und Xing und
- Kontaktnahme über Firmen-Portal / Firmen-Email-Adresse / Telefon.

Die Firmen wurden informiert, dass ein offizielles Anschreiben mit der Projektdarstellung und ein dazu gehöriger Interviewleitfaden ihnen zugesendet wird (Anhang A.1.2 undA.1.3). Parallel wurde angefragt ob es möglich wäre, generelle Themen über Rotorblätter mit zusätzlichen Interviews zu besprechen. Oft wurde eine Geheimhaltungsvereinbarung von den Firmen erbeten, um eine Kontrolle über die Rohdaten zu behalten.

Persönliche Termine konnten aufgrund der Corona-Pandemie nicht stattfinden.

A.1.2 Interviewleitfaden (lang)



„Entwicklung von Rückbau- und Recyclingstandards für Rotorblätter“

Wie lassen sich anfallende Rotorblattmaterialien und -mengen
für die nächsten 10-30 Jahre verlässlich prognostizieren?

Interviewleitfaden zum
ReFoPlan-Vorhaben des Umweltbundesamtes
Arbeitspaket 1: Rotorblattkonstruktionen

Name und Firma des Interviewpartners: Datum:

.....

.....

A) Basisdaten des Unternehmens:

1 Unternehmensgröße
Mitarbeiter .....
Umsatz .....

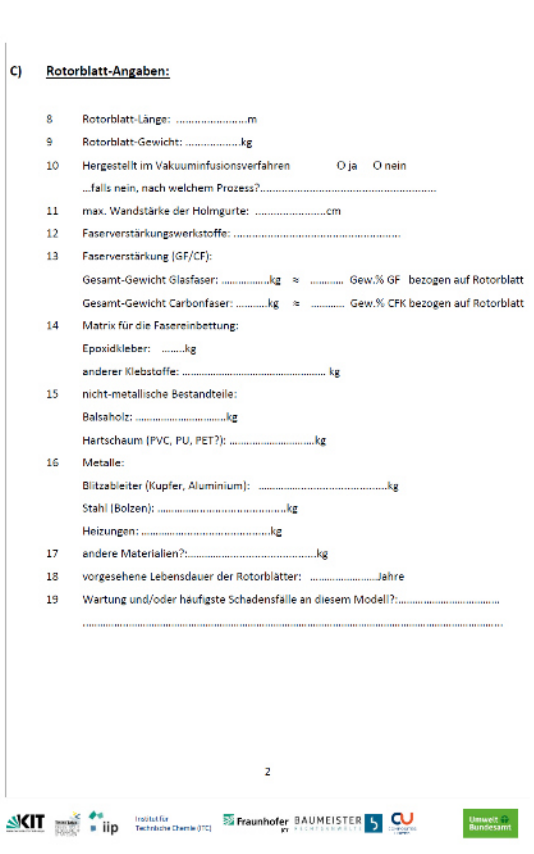
2 Branche Wind-Energie-Anlagen
Hersteller O ja O nein
EoL-Verwerter O ja O nein
Wartung/Reperatur O ja O nein

3 Region .....

B) Spezifische WEA-Angaben:

4 Modell-Bezeichnung: .....Nenn-Leistung (MW):
5 Durchmesser des Rotors: .....m
6 Versteifungselemente (Gurte/Holme): .....
7 Ist das Rotorblatt aus 2 Blattschalen aufgebaut? O ja O nein

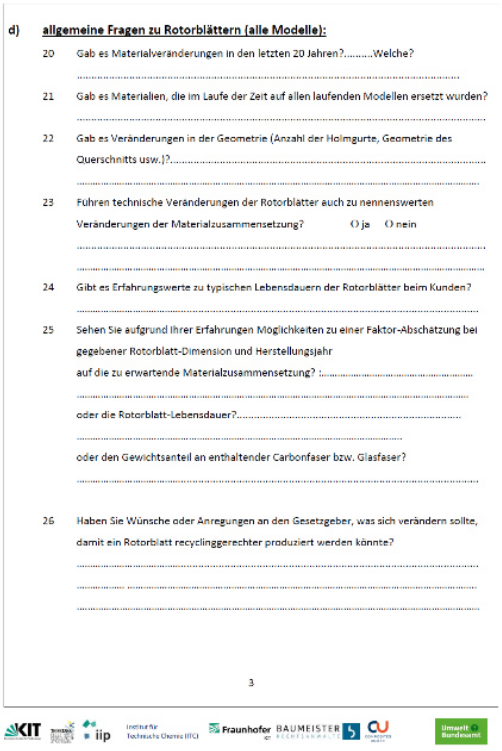
1



C) Rotorblatt-Angaben:

8 Rotorblatt-Länge: .....m
9 Rotorblatt-Gewicht: ..... kg
10 Hergestellt im Vakuuminfusionsverfahren O ja O nein
...falls nein, nach welchem Prozess?.....
11 max. Wandstärke der Holmgurte: .....cm
12 Faserverstärkungswerkstoffe: .....
13 Faserverstärkung (GF/CF):
Gesamt-Gewicht Glasfaser: .....kg ≈ ..... Gew.% GF bezogen auf Rotorblatt
Gesamt-Gewicht Carbonfaser: .....kg ≈ ..... Gew.% CFK bezogen auf Rotorblatt
14 Matrix für die Fasereinbettung:
Epoxidkleber: .....kg
anderer Klebstoffe: ..... kg
15 nicht-metallische Bestandteile:
Balsaholz: .....kg
Hartschaum (PVC, PU, PET?): .....kg
16 Metalle:
Blitzableiter (Kupfer, Aluminium): .....kg
Stahl (Bolzen): .....kg
Heizungen: .....kg
17 andere Materialien?:.....kg
18 vorgesehene Lebensdauer der Rotorblätter: .....Jahre
19 Wartung und/oder häufigste Schadensfälle an diesem Modell?:.....
.....

2



d) **allgemeine Fragen zu Rotorblättern (alle Modelle):**

20 Gab es Materialveränderungen in den letzten 20 Jahren?.....Welche?

21 Gab es Materialien, die im Laufe der Zeit auf allen laufenden Modellen ersetzt wurden?

22 Gab es Veränderungen in der Geometrie (Anzahl der Holmgurte, Geometrie des Querschnitts usw.)?.....

23 Führen technische Veränderungen der Rotorblätter auch zu nennenswerten Veränderungen der Materialzusammensetzung? O ja O nein

24 Gibt es Erfahrungswerte zu typischen Lebensdauern der Rotorblätter beim Kunden?

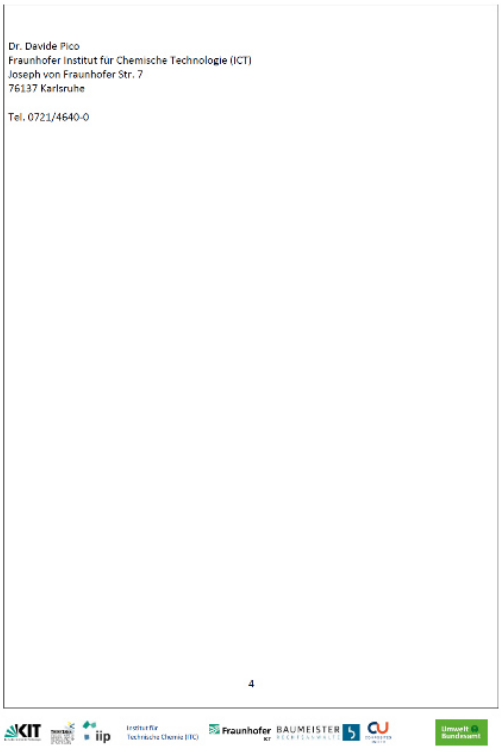
25 Sehen Sie aufgrund Ihrer Erfahrungen Möglichkeiten zu einer Faktor-Abschätzung bei gegebener Rotorblatt-Dimension und Herstellungsjahr auf die zu erwartende Materialzusammensetzung? :.....

oder die Rotorblatt-Lebensdauer?.....

oder den Gewichtsanteil an enthaltender Carbonfaser bzw. Glasfaser?.....

26 Haben Sie Wünsche oder Anregungen an den Gesetzgeber, was sich verändern sollte, damit ein Rotorblatt recyclinggerechter produziert werden könnte?.....

3



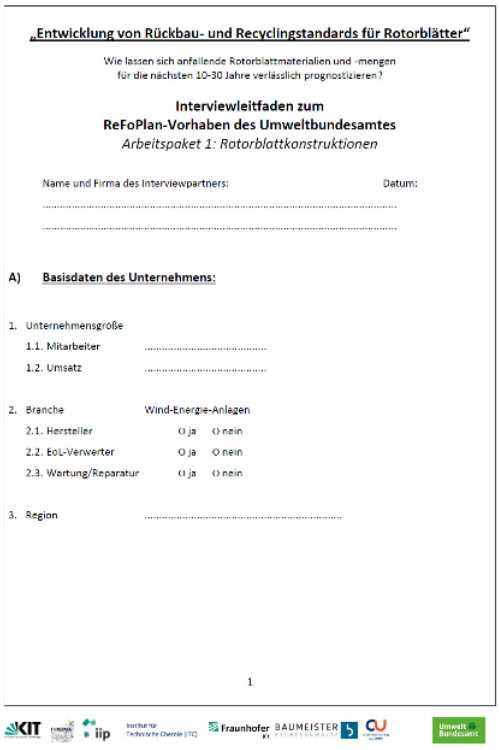
Dr. Davide Pico
Fraunhofer Institut für Chemische Technologie (ICT)
Joseph von Fraunhofer Str. 7
76137 Karlsruhe

Tel. 0721/4640-0

4

Quelle: Eigene Zusammenstellung, Fraunhofer-ICT.

A.1.3 Interviewleitfaden (Kurz)



„Entwicklung von Rückbau- und Recyclingstandards für Rotorblätter"

Wie lassen sich anfallende Rotorblattmaterialien und -mengen für die nächsten 10-30 Jahre verlässlich prognostizieren?

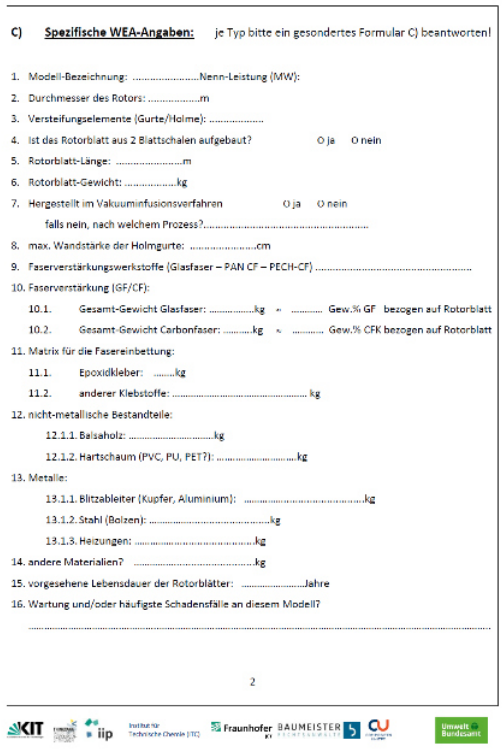
Interviewleitfaden zum
ReFoPlan-Vorhaben des Umweltbundesamtes
Arbeitspaket 1: Rotorblattkonstruktionen

Name und Firma des Interviewpartners: Datum:

A) Basisdaten des Unternehmens:

1. Unternehmensgröße
   1.1. Mitarbeiter .....
   1.2. Umsatz .....
2. Branche Wind-Energie-Anlagen
   2.1. Hersteller O ja O nein
   2.2. EoL-Verwerter O ja O nein
   2.3. Wartung/Reparatur O ja O nein
3. Region .....

1



C) Spezifische WEA-Angaben: je Typ bitte ein gesondertes Formular C) beantworten!

1. Modell-Bezeichnung: .....Nenn-Leistung (MW):
2. Durchmesser des Rotors: .....m
3. Versteifungselemente (Gurte/Holme): .....
4. Ist das Rotorblatt aus 2 Blattschalen aufgebaut? O ja O nein
5. Rotorblatt-Länge: .....m
6. Rotorblatt-Gewicht: .....kg
7. Hergestellt im Vakuuminfusionsverfahren O ja O nein
   falls nein, nach welchem Prozess?.....
8. max. Wandstärke der Holmgurte: .....cm
9. Faserverstärkungswerkstoffe (Glasfaser – PAN CF – PECH-CF) .....
10. Faserverstärkung (GF/CF):
    10.1. Gesamt-Gewicht Glasfaser: .....kg = ... Gew.% GF bezogen auf Rotorblatt
    10.2. Gesamt-Gewicht Carbonfaser: .....kg = ... Gew.% CFK bezogen auf Rotorblatt
11. Matrix für die Fasereinbettung:
    11.1. Epoxidkleber: .....kg
    11.2. anderer Klebstoffe: ..... kg
12. nicht-metallische Bestandteile:
    12.1.1. Balsaholz: ..... kg
    12.1.2. Hartschaum (PVC, PU, PET?): ..... kg
13. Metalle:
    13.1.1. Blitzableiter (Kupfer, Aluminium): ..... kg
    13.1.2. Stahl (Bolzen): ..... kg
    13.1.3. Heizungen: ..... kg
14. andere Materialien? ..... kg
15. vorgesehene Lebensdauer der Rotorblätter: .....Jahre
16. Wartung und/oder häufigste Schadensfälle an diesem Modell?

2

Quelle: Eigene Zusammenstellung, Fraunhofer-ICT.

A.1.4 Übersicht der kontaktierten Unternehmen

Firma	Kontaktname	Funktion	bekannter Kontakt
ENERCON	Florian Rubner	Head of Unit Rotor Blade bei Enercon	JA
ENERCON	Kerstin Dorenbusch	Head of Sustainability and Environment Environmental Management	JA
ENERCON	Jost Backhaus	Managing Board COO	NEIN
ENERCON	Eric Unger	R&D	JA
SIEMENS GAMESA	Pablo Muro Zaratiegui	Blade Manufacturing Engineering Director	NEIN
SIEMENS GAMESA	Bjoern Goerke	Senior Project Manager	NEIN
SIEMENS GAMESA	Andreas Nauen	CEO	NEIN
SIEMENS GAMESA	Steffen Laustsen	Head Of Department, Blade Technology (R&D)	JA
SIEMENS GAMESA	Jonas Pagh Jensen	EHS Specialist / Leiter der Task Recycling bei Wind Europe	JA
SIEMENS GAMESA RENEWABLE ENERGY	Eva M. PRIETO PORTILLA	Materials Engineering Leader	NEIN
VESTAS	Felix Brüning	Market Intelligence Specialist at Vestas	JA
VESTAS	Allan Poulsen	Cluster Lead Sustainability and Advanced Materials hos Vestas	JA
VESTAS	Peter Garrett	QSE Lead Advanced QSE	JA
NORDEX	Luis Blanco	CEO	NEIN
NORDEX	Patxi Landa	Chief Sales Officer	NEIN
NORDEX	Melanie Welzel	Head of Global Sustainability Mgmt.	JA
NORDEX	Tony Philipp Adam	Public Affairs	JA
Wind Europe	Diana Barrios	Business Development Manager	JA
Wind Europe	Marylise Schmid	Analyst - Environment and planning	JA
LM Wind Power	Chris Berkhout	Specialist, Sustainability	NEIN
LM Wind Power	Katelyn Huber	Product Life Cycle, Project Leader-Engineering	JA

Firma	Kontaktname	Funktion	bekannter Kontakt
EUCIA	Roberto Frassine	President	JA
SENVION	Micha Schulz	Managing Director at Senvion GmbH	NEIN
3AComposites	Roman Gätzi	Firma Produziert Core Materials / Balsaholz	JA
NEOCOMP GmbH	Hans-Dieter Wilcken	CEO	JA
Fraunhofer WKI	Meinlschmidt, Peter		JA
	Jan D. Walter	Freier Journalist	JA

Quelle: Eigene Zusammenstellung, Fraunhofer-ICT.

A.2 Anhang Kapitel 4

Leitfaden für die Industrie Befragung

TP3: Baustellenseitige Abfallbehandlung

Hinweis an die Unternehmen: die Ergebnisse werden im Rahmen des UBA Projektes ermittelt und sollen im Zwischen- und Abschlussbericht veröffentlicht werden. Es besteht die Möglichkeit einer Anonymisierung der Daten und die Inhalte sollen im Vorfeld zur Überprüfung versandt werden.

1) Beschreibung der Technologie zur Demontage von Rotorblättern (einschließlich der Sicherheitsmaßnahmen)

2) Demontageziel (Flexibilität + Technische Möglichkeiten zur Erreichung des Demontageziels (Trennung in die unterschiedlichen Materialfraktionen(GFK, GFK Sandwich, CFK Gurte mit GFK Lagen, Flanschbereich) in Abhängigkeit vom Aufwand)

Wie werden die Rotorblätter mit ihrer Technologie zerlegt? In transportfähige Stücke und dann weitere Zerlegung am lokalen Standort? Besteht die Möglichkeit CFK Fraktionen oder z.B. Füllstoffe wie Balsaholz bei der Demontage herauszutrennen? Können individuelle frei gestaltbare Formen bereitgestellt werden um in Situ unterschiedliche Fraktionen zu gewinnen?

3) Abfrage zu den Bewertungskriterien

1. Partikel Luftemissionen

Bei der Demontage von Rotorblättern könnten Partikeln erzeugt und freigesetzt werden, die in die Luft abgegeben werden und damit den Boden und die Gewässer eventuell kontaminieren könnten.

Welche Technologie Lösungen gibt es auf den Markt bzw. welche Maßnahmen müssen angehalten werden damit die Partikeln nicht freigesetzt werden? Was für Systeme sind bei Ihnen benutzt?

Mögliche Antwortvorschlage:

- ☐ Nicht definierbar, hohes Kontaminationsrisiko
- ☐ Durch die Technologie werden Partikel nachweisbar freigesetzt, aber keine Maßnahmen zur Bindung getroffen
- ☐ Durch die Technologie werden Partikel freigesetzt, aber über eine Absaugung oder Bewässerung gebunden, Freisetzung über die Luft nicht nachgewiesen
- ☐ Durch die Technologie werden Partikel freigesetzt, aber über eine Absaugung oder Bewässerung gebunden, nachgewiesen keine Freisetzung über die Luft
- ☐ Durch die Technologie werden Partikel freigesetzt, aber über eine Einhausung gebunden
- ☐ Durch die Technologie werden keine Partikel nachweisbar freigesetzt

Besteht noch Entwicklungsbedarf in der Technologie? Wenn ja, welcher?

Besteht noch Bedarf zur Entwicklung rechtlicher Vorgaben/ Regeln?

2. **Befahrung / Bodenverdichtung**

Es gilt anzugeben wie viele und welche Transportsysteme bei unterschiedlichen Demontagestrategien genutzt werden.

Was für Transportlaster werden in den Regeln benutzt um die demontierte Windblätter zu transportieren? Gibt es eine Unterschied zwischen unterschiedliche Rotorblätter (Anzahl der Rotorblätter zu demontieren / große der Rotorblätter)

Mögliche Antwortvorschlage:

- ☐ Die Bodenverdichtung und Befahrung durch die Demontagetechnologie ist viel höher als die Auswirkungen durch die Demontage der WEA
- ☐ Große Laster (> x Tonnen)
- ☐ Kleine Laster (< y Tonnen)
- ☐ keine Auswirkungen auf die Bodenverdichtung bzw. keine übermäßige Befahrung durch Technologie und Abtransport

Besteht noch Entwicklungsbedarf in der Technologie? Wenn ja, welcher?

Besteht noch Bedarf zur Entwicklung rechtlicher Vorgaben/ Regeln?

3. **Gewässer**

Systeme benötigen Wasser um die emittierte Partikeln abzufangen. Dieses Wasser ist kontaminiert und muss gefangen werden, damit Boden und Wasserquelle vom Partikeln nicht kontaminiert werden.

Wir Wasser in Ihre Prozess benötigt? Wie wird das kontaminierte Wasser behandelt?

Mögliche Antwortvorschlage:

- ☐ Der Boden wird Kontaminiert, ohne Schutz.
- ☐ Prozesswasser wird gefangen und entsorgt
- ☐ Prozesswasser wird direkt filtriert und im Kreislauf verwendet

Besteht noch Entwicklungsbedarf in der Technologie? Wenn ja, welcher?

Besteht noch Bedarf zur Entwicklung rechtlicher Vorgaben/ Regeln?

4. **Sicherheit (für den Technologiebediener)**

Gefahr für den Technologiebediener durch den Demontageprozess. (Verletzung-, Unfall- Risiko)

Wie wird ihre Demontage Verfahren bedient? Bestehen Gefahren für die Mitarbeiter bzw. Was für Sicherheitsmaßnahmen gibt für die Mitarbeiter und das Personal in die Demontage Area?

Mögliche Antwortvorschlage:

- ☐ Nicht definierbar, hohes Sicherheitsrisiko
- ☐ Zusätzliche Maßnahmen großtechnisch noch nicht erprobt
- ☐ manuelle Bedienung notwendig und Risikofaktoren sind innerhalb des Operatorfelds
- ☐ manuelle Bedienung notwendig aber Risikofaktoren sind außerhalb des Operatorfelds
- ☐ autarke Bedienung

Besteht noch Entwicklungsbedarf in der Technologie? Wenn ja, welcher?

Besteht noch Bedarf zur Entwicklung rechtlicher Vorgaben/ Regeln?

5. **Lärm/Schall**

Geräuschbelastung durch die Technologie für Mensch und Natur

Wie stark in Bezug auf Intensität und Dauer ist die Geräuschbelastung? Welche Phase ist bei der Demontage die lauteste? Wie lange dauert insgesamt die Lärmemission und wie kann ich mich vorstellen wie Laut (db oder Vergleich Beispiel) es ist?

Dauer (z.B. pro Rotorblatt oder pro Rotorblattsatz):

Intensität (db):

Besteht noch Entwicklungsbedarf in der Technologie? Wenn ja, welcher?

Besteht noch Bedarf zur Entwicklung rechtlicher Vorgaben/ Regeln?

6. **Sortenreinheit/ Qualität der Fraktionen**

Grad der Trennung/ Schnittlinien – ob die Fraktionen für eine spätere Verwertung beeinträchtigt/ beschädigt wird.

Ist es möglich unterschiedlichen Fraktion sortenrein und in gute Qualität mit Ihrer Technologie zu gewinnen oder werden Fraktionen durch die Demontage geschädigt? Sind Ihnen solche Technologien bekannt?

Was passiert mit den Fraktionen nach der Demontage?

7. **Energiebedarf**

Wir versuchen auch den Energiebedarf zu untersuchen. Ist es möglich die bereitzustellende Energie für das System (Demontage + Emissionsminderung etc.) zu schätzen? Z.B.

3 oder 30 Rotorblätter 1,5MW Klasse Standard Rotordurchmesser 66-77m
3 oder 30 Rotorblätter 3 MW Klasse Rotordurchmesser 90m-105m

Scenarien [Energiebedarf]	3 Rotorblätter	30 Rotorblätter
1,5MW / Rotordurchmesser 66-77m	KW	KW
3 MW / Rotordurchmesser 90m-105m	KW	KW

8. **Wirtschaftlichkeit für die zwei Szenarien**

Kosten für die Demontage und auch die Emissionsbindende Maßnahme

Scenarien [Energiebedarf]	3 Rotorblätter	30 Rotorblätter
1,5MW / Rotordurchmesser 66-77m	€	€
3 MW / Rotordurchmesser 90m-105m	€	€

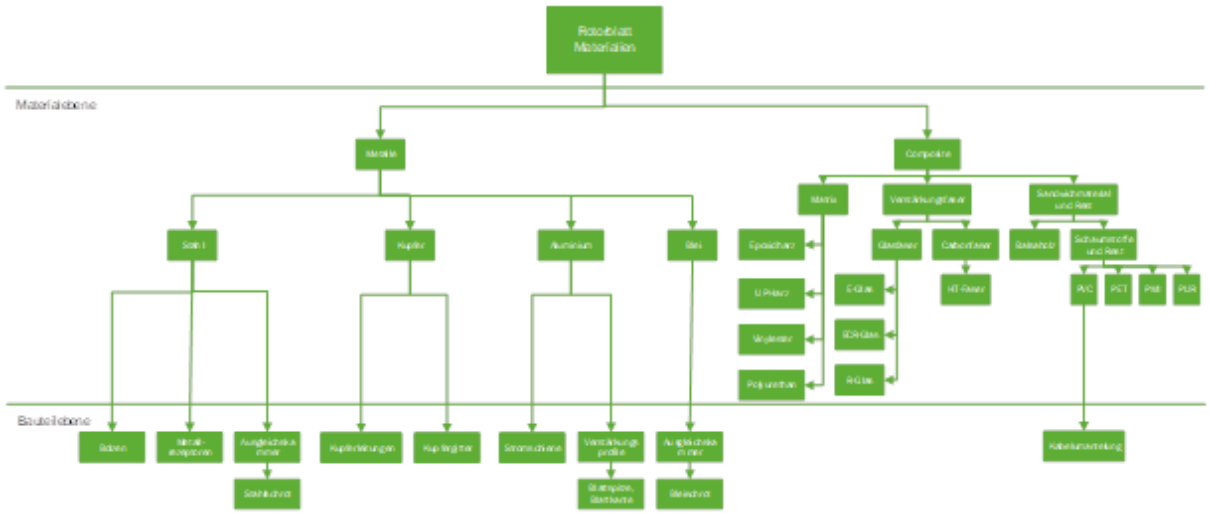
9. **Verfahrensreife/ Praxistauglichkeit**

Sind Ihnen alternative neue Technologie bekannt die noch nicht etabliert sind? Was für Forteile und was für Nachteilen haben diese Technologien? Wie Reif sind diese Technologien?

Betrifft vor allem die neuen Verfahren, wie bei denen der Entwicklungsstand ist und ob diese uneingeschränkt vor Ort an der WKA einsetzbar sind

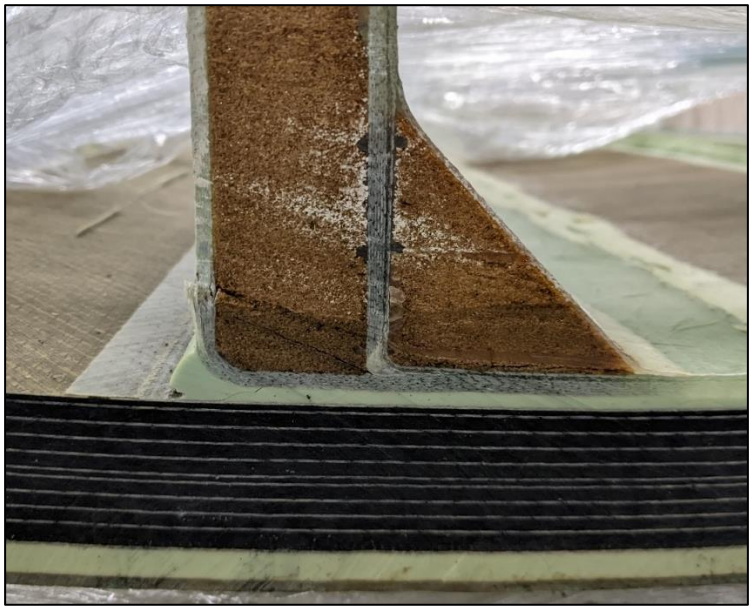
A.3 Anhang Kapitel 5

Abbildung 191: Materialien im Rotorblatt und abgeleitete Bauteile



Quelle: Eigene Darstellung, Fraunhofer-ICT.

Abbildung 192: CFK-Aufbau am Gurt im Querschnitt.



Quelle: Fraunhofer-ICT.

Tabelle 88: Aktueller Stand der Unternehmen

Unternehmen/Beteiligte	Tätiger Bereich	Bekannte Technologie
Andritz MeWa	Zerkleinerung	Querstromzerspaner, div. Shredder
Bcircular (Spanien)	Aufbereitung, Verwertung	
Brandenburgische Technische Universität Cottbus	Zerkleinerung	DE102018103702A1 (Pending)

Unternehmen/Beteiligte	Tätiger Bereich	Bekannte Technologie
Carbon Werke Weissgerber	Zerkleinerung	DE102017110281A1 (Pending)
CFK Valley Stade Recycling (carboNXT)	Aufbereitung, Verwertung	Pyrolyse
Dieffenbacher	Zerkleinerung	Querstromzerspaner, div. Shredder
Eco-Wolf	Zerkleinerung	(Hammermühle) Shredder
ELG Carbon Fibre International GmbH	Aufbereitung, Verwertung	Pyrolyse
Ercom (DE - Insolvent)	Aufbereitung	Hammermühle, Metallabscheider, Zyklone, Siebe
Eurecum	Demontage, Aufbereitung	Doppelwellenzerkleinerer, Einwellenmesserrotor
Extreme-ecosolutions (NL)	Aufbereitung, Verwertung	
Fiberline	Aufbereitung	
Filon Products Ltd. (UK)	Aufbereitung, Verwertung	
Hadeg Recycling GmbH	Aufbereitung, Verwertung	
Hambleside Danelaw (UK)	Aufbereitung, Verwertung	
Karborec (ITA)	Aufbereitung, Verwertung	Pyrolyse
MCR (Mixt Composites Recyclables-Customised Composites) (FRA)	Aufbereitung, Verwertung	Shredder
MUEG	Zerkleinerung	DE102010046685B4(Aktiv), Querstromzerspaner, Kugelmühle
Neocomp	Aufbereitung	Vorzerkleinerung, Querstromzerspaner, Metallabscheidung
Phoenix Fiberglass (USA - Insolvent)	Aufbereitung	Hammermühle, Metallabscheider, Zyklone, Siebe
REACT Project (HEBO und KEMA)	Aufbereitung	Hybrid-Shredder Prototyp (Hammer)
Reprocover (Belgien)	Aufbereitung, Verwertung	
THM Recycling Solutions GmbH	Zerkleinerung	Querstromzerspaner, div. Shredder

Unternehmen/Beteiligte	Tätiger Bereich	Bekannte Technologie
University of Nottingham	Verwertung	
Vartega (USA)	Aufbereitung, Verwertung	
Wittmann	Zerkleinerung	Schneidmühle
WP Systems	Demontage, Aufbereitung	DE102016113329B3 (Aktiv)

Quelle: Eigene Zusammenstellung, Fraunhofer-ICT.

A.4 Anhang Kapitel 6

A.4.1 Primärrouten der Metallherstellung

Im Folgenden werden die wesentlichen Primärrouten zur Gewinnung von Stahl, Aluminium und Kupfer dargestellt.

Stahlerzeugung aus Eisenerzen

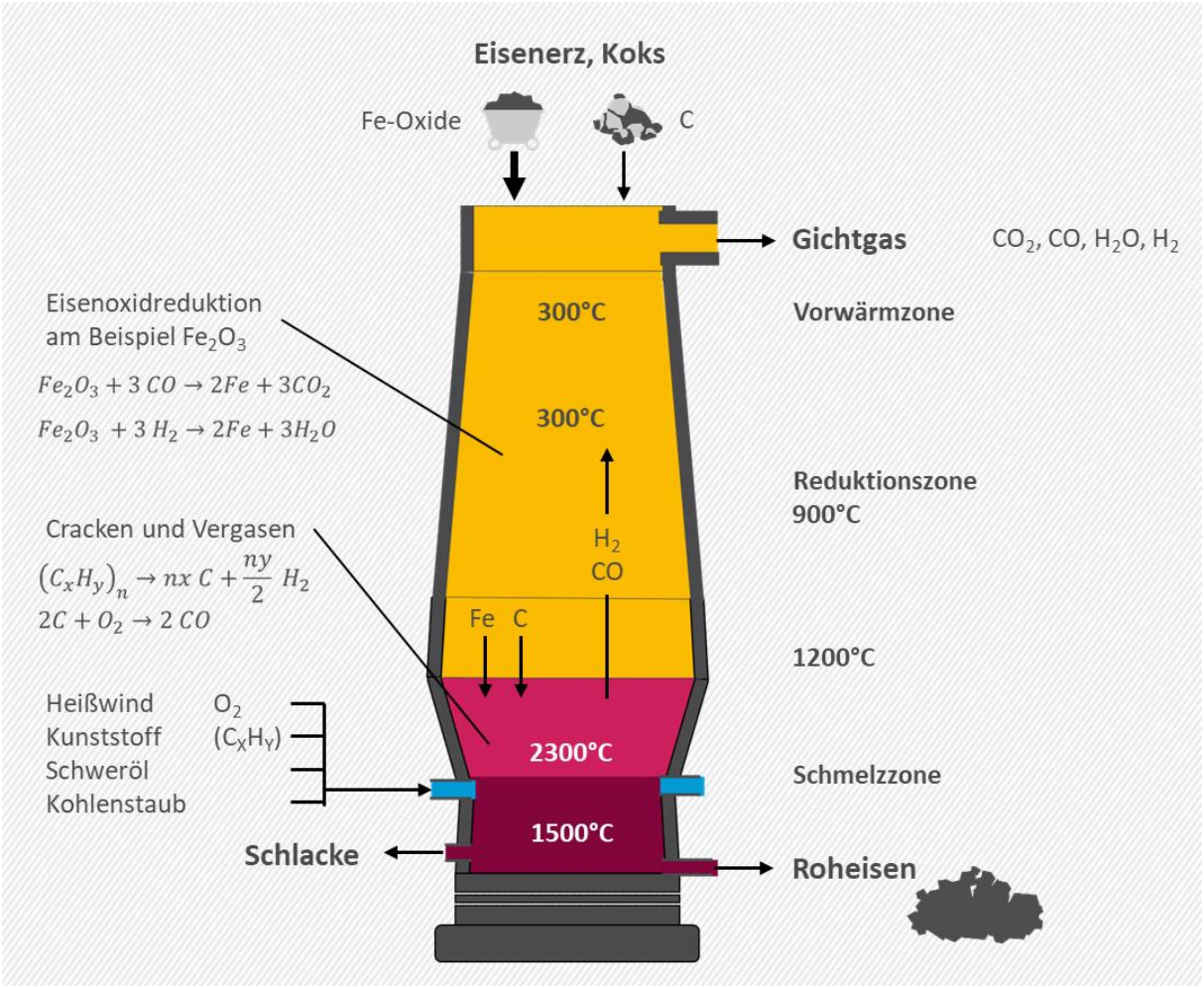
Die Herstellung von Primärstahl erfolgt hauptsächlich über die Gewinnung von Roheisen aus oxidischen Eisenerzen im **Hochofen** und nachfolgender Verarbeitung zu Rohstahl im Sauerstoffkonverter (Broadbent 2016; Worrel und Reuter 2014; Wirtschaftsvereinigung Stahl 2019). Große Hochöfen mit etwa 15 m Gestelldurchmesser produzieren täglich bis zu 13.000 t an Roheisen (Tabelle 89) und die daraus resultierende produzierte Jahresmenge eines solchen Ofens liegt bei über 4 Mio. t Roheisen (Wirtschaftsvereinigung Stahl 2019). Im Hochofen werden Eisenerze, Zuschläge, Koks und Reduktionsmittel (Kohle, Öl oder Gas) geschmolzen und zu flüssigem Roheisen verarbeitet (Abbildung 193). Hierzu werden im unteren Teil des Ofens heiße Luft mit einer Temperatur von etwa 1.200 °C zusammen mit Kohlenstaub sowie Erdgas oder Schweröl eingeblasen, wodurch ein Teil des teueren Kokses substituiert werden kann. Bei Eintritt in den Ofen vergasen diese Zusatzstoffe mit dem Sauerstoff der Heißluft unmittelbar unter Bildung eines CO/H_2-haltigen Gasgemisches. Bei diesem Vorgang werden Temperaturen bis zu 2.300°C erzeugt. Dieses Gas steigt nach oben und reduziert den Einsatzstoff Eisenerz, der dem Ofen zusammen mit Koks und weiteren Zuschläge von oben zugeführt wird. Das dabei entstandene flüssige Roheisen sammelt sich am unteren Teil des Hochofens und kann abgeführt werden. Unerwünschte Elemente und Verbindungen in den Einsatzstoffen bilden eine flüssige Schlacke, welche ebenfalls am unteren Teil des Ofens abgeführt wird (Broadbent 2016, S. 1660; Worrel und Reuter 2014; Wirtschaftsvereinigung Stahl 2019; Martens und Goldmann 2016).

Tabelle 89: Edukt- und Produktmengen eines großen Hochofens mit einem Gestelldurchmesser von 15 m und einem Gesamtvolumen von 6.000 m³.

Material	Menge [t/Tag]	Volumen [m³/Tag]
Edukte		
Eisenerze	20.800	-
Koks	4.300	-
Einblaskohle	1.900	-
Luft	-	12.000.000
Produkte		
Roheisen	13.000	-
Schlacke	3.600	-
Hochofengas	-	18.000.000

Quelle: Eigene Zusammenstellung, KIT-ITC, nach Wirtschaftsvereinigung Stahl (2019).

Abbildung 193: Schematische Darstellung des Hochofenprozesses zur Herstellung von Roheisen inkl. wesentlicher Edukte und Produkte sowie Reaktionen.



Quelle: Eigene Darstellung, KIT-ITC, nach Martens und Goldmann (2016).

Um störende Elemente wie Kohlenstoff, Silizium, Schwefel und Phosphor aus dem Roheisen zu entfernen, wird dieses in Sauerstoffkonvertern nachbehandelt, die bis zu 400 t Rohstahl fassen. Durch Zugabe von Kalk und das Einblasen von Sauerstoff werden die Elemente und Verbindungen oxidiert und bilden eine flüssige Schlacke, welche auf der Oberfläche des Metallbads schwimmt. Diese exothermen Reaktionen setzen große Mengen an thermischer Energie frei und um eine unkontrollierte Wärmeentwicklung zu vermeiden, werden dem Konverter 10 bis 25 % Stahlschrott zur Kühlung der Schmelze zugegeben (Wirtschaftsvereinigung Stahl 2019; Worrel und Reuter 2014).

Um die hohen Anforderungen an moderne Stähle zu erfüllen, werden die im Konverter gewonnenen Stahlschmelzen weiter nachbehandelt. Dieser Vorgang wird im Allgemeinen als Sekundärmetallurgie bezeichnet und findet in Pfannenöfen statt. Wichtigstes Ziel ist dabei die Reduktion des im Stahl gelösten Eisenoxids (FeO). Zusätzlich werden Prozesse wie die Legierungseinstellung, Mischung und Homogenisierung, die Entfernung von Schwefel und Phosphor sowie eine Spülgasbehandlung mit Inertgasen durchgeführt (Martens und Goldmann 2016; Wirtschaftsvereinigung Stahl 2019).

Je nach Nachbehandlung werden Stähle in niedrig- und hochlegierte, unlegierte, nichtrostende und andere legierte Stähle unterteilt. Die wesentlichen Unterschiede sind dabei deren chemische Zusammensetzungen bzw. Massenanteile der Legierungselemente, wobei die Hauptlegierungselemente von Stahl Mangan, Silizium, Chrom, Nickel, Molybdän, Wolfram,

Vanadium, Titan und Niob sind (Martens und Goldmann 2016, S. 120–123; Worrel und Reuter 2014).

Alternativ zur Hochofenroute kann Eisenerz in **Schmelz- oder Direktreduktionsanlagen** reduziert werden, bei denen kein Einsatz von Koks erforderlich ist. Bei diesem Prozess wird festes Eisenerz durch ein CO- und H_2-haltiges Gas zum porösen Eisenschwamm reduziert, der nachfolgend in Elektrolichtbogenöfen gemeinsam mit Stahlschrott zu Rohstahl verarbeitet werden kann (Wirtschaftsvereinigung Stahl 2019).

Herstellung von Primäraluminium aus Bauxit

Die Herstellung von Primäraluminium kann vereinfacht durch zwei aufeinanderfolgende Teilschritte beschrieben werden:

- Mehrstufige Umwandlung von Bauxit zu Aluminiumoxid (Al_2O_3) nach dem Bayer-Verfahren,
- nachfolgende Schmelzflusselektrolyse nach dem Hall-Hérault-Verfahren.

Beim **Bayer-Verfahren** wird gemahlenes und getrocknetes Bauxit, ein Mischerz aus Aluminiumhydroxid ($Al(OH)_3$) und Aluminiumoxidhydroxid, (AlO(OH)) sowie bis zu 30 % Eisenoxid (Fe_2O_3) und Siliciumoxid (SiO_2), zunächst für etwa 8 Stunden bei Drücken zwischen 5 bis 7 bar mit bis zu 250 °C heißer 38 %-iger Natronlauge behandelt. Dabei reagieren die Aluminiumverbindungen mit der Natronlauge zu löslichem Natriumaluminat und unlöslichen Rückständen, dem sog. Rotschlamm, der nachfolgend abgetrennt wird:

Bauxit + NaOH →$Na[Al(OH)_4]$ + Rotschlamm

Die gereinigte Lösung wird nachfolgend abgekühlt und mit Wasser verdünnt, wodurch Aluminiumhydroxid ausfällt:

$Na[Al(OH)_4] \rightarrow Al(OH)_3 + NaOH$.

Reines Aluminiumoxid wird durch nachfolgendes Glühen des Hydroxids bei 1.200°C erhalten:

$2\ Al(OH)_3 \rightarrow Al_2O_3 + 3\ H_2O$

(Capuzzi und Timelli 2018; Achternbosch et al. 2003; Mortimer und Müller 2020).

Der Rotschlamm wird eingedickt und deponiert, wobei je nach Herkunft des Bauxits und dem darin enthaltenen Aluminium-Gehalt pro Tonne Tonerde 360 bis 800 kg Rotschlamm anfallen (Capuzzi und Timelli 2018).

Die nachfolgende Schmelzflusselektrolyse nach dem **Hall-Hérault-Verfahren** dient zur Gewinnung von reinem Aluminium aus dem Al_2O_3. Dazu wird das Oxid zur Senkung der Schmelztemperatur zunächst mit dem Mineral Kryolith gemischt. Diese Mischung wird in eine stählerne, mit Graphit als Kathode verkleidete Elektrolysezelle gefüllt und als Anode eine Graphitelektrode verwendet.

Durch Anlegen einer Spannung dissoziiert das flüssige Al_2O_3:

$Al_2O_3 \rightarrow 2\ Al^{3+} + 3\ O^{2-}$

Die Aluminium-Kationen werden an der Kathode zu flüssigem, reinem Aluminium reduziert:

$Al^{3+} + 3e^- \rightarrow Al$

während die freigesetzten Sauerstoff-Anionen zur graphitischen Anode wandern und dort zu CO_2 reagieren:

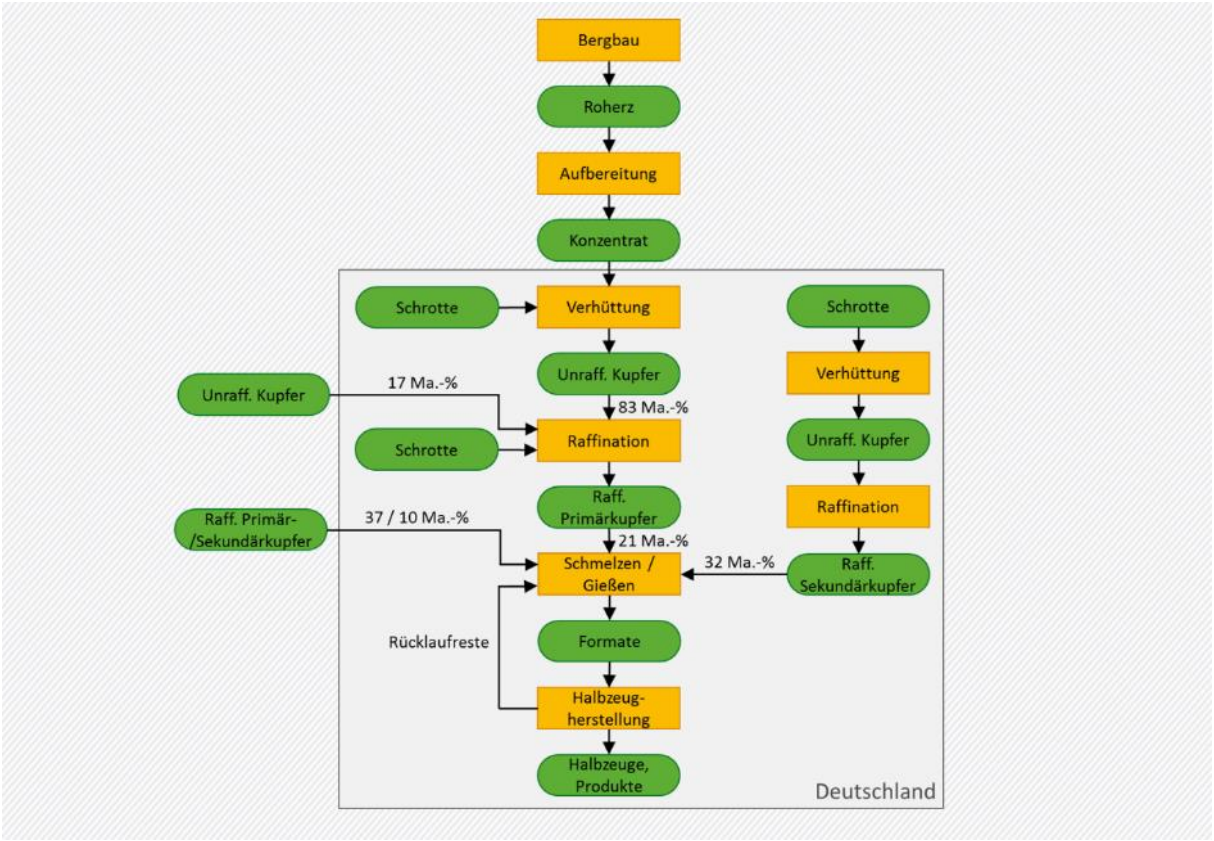
$C + 2\ O^{2-} \rightarrow CO_2 + 4e^-$

Je nach Anwendungsbereich des Aluminiums können weitere Verfahrensschritte, Nachbehandlungen und Veredelungsverfahren angeschlossen werden (Achternbosch et al. 2003; Capuzzi und Timelli 2018).

Herstellung von Kupfer aus Erzen

Natürliches Kupfer ist fast ausschließlich in Form von sulfidischen und oxidischen Mineralien vorzufinden (Gilsbach 2020) und zur Gewinnung von reinem Kupfer aus diesen Erzen sind eine Reihe von Prozessen notwendig (Abbildung 194).

Abbildung 194: Schematische Darstellung der Prozesskette zur Herstellung von Kupfer aus Erzen.

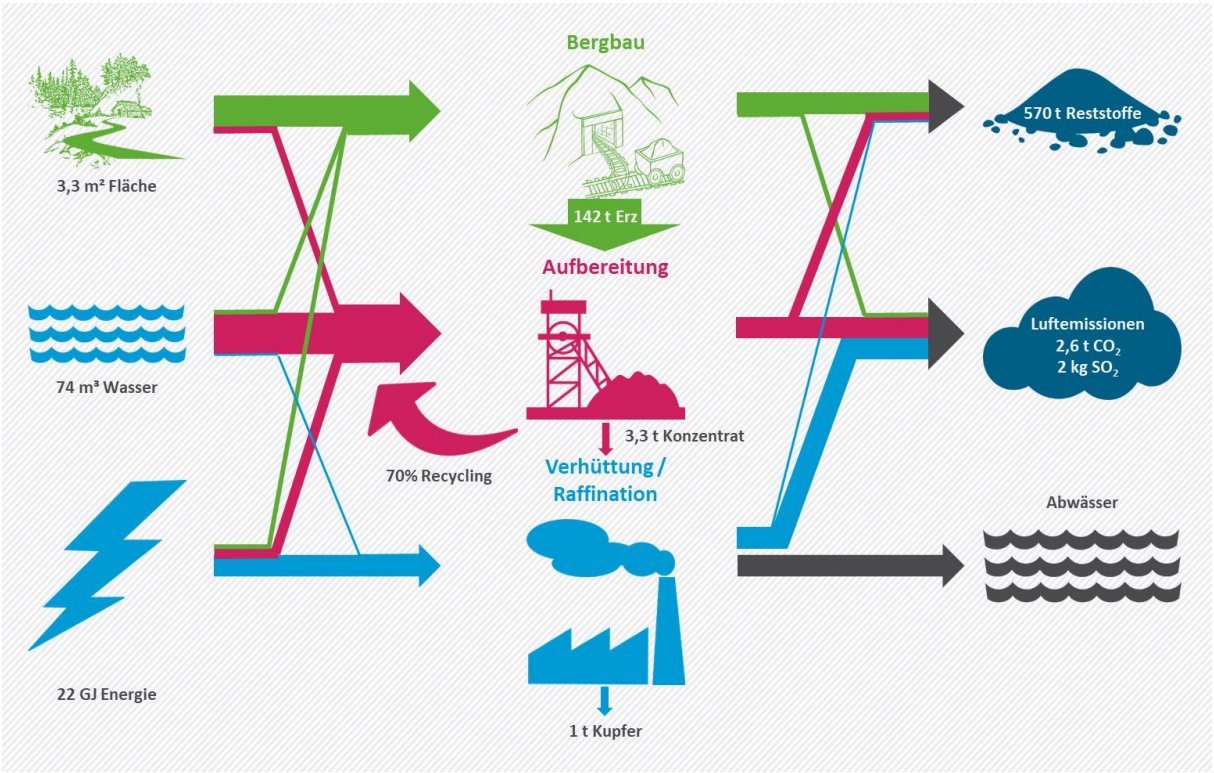


Quelle: Eigene Darstellung, KIT-ITC, gekürzt nach Corradini et al. (1999).

Für die pyrometallurgische Gewinnung von Kupfer wird aus den Mineralien zunächst ein Kupferkonzentrat hergestellt. Die Kupfererze werden dabei unter Zugabe von Wasser gemahlen und Nebengesteine abgetrennt. Das erhaltene Kupferkonzentrat wird mit Koks und Kohle in einem Schmelzofen verhüttet. Dabei entsteht Kupferstein, welches einen Kupfergehalt von 30 bis 80 % aufweist (Gilsbach 2020; Corradini et al. 1999). Aufgrund der stark exothermen Prozesse und der damit einhergehenden hohen Wärmefreigabe werden den Schmelzprozessen zur Kühlung oft reine Kupferschrotte mit hohem Kupfergehalt zugeführt (Worrel und Reuter 2014; Deutsches Kupferinstitut). Durch Zugabe von Koks werden Begleitelemente und unerwünschte Verbindungen verschlackt und aus dem Ofen abgeführt. Im nachfolgenden Schritt wird der Kupferstein mit Sauerstoff konvertiert, wodurch weitere Verunreinigungen selektiv oxidiert und entfernt werden. Das Produkt des Konvertierprozesses ist Kupfer mit einer Reinheit von 94 bis 97 %. In einer anschließenden Schmelzraffination werden erneut weitere Verunreinigungen entfernt und zurück bleibt Kupfer mit einem Kupfergehalt von etwa 99 %, welches zu Kupferanoden gegossen wird. Abschließend werden edlere Metalle wie Silber und Gold mittels elektrolytischer Raffination entfernt, wodurch die Reinheit auf 99,95 bis 99,99 % steigt (Gilsbach 2020; Corradini et al. 1999).

Eine Übersicht über die benötigten Ressourcen und anfallenden Nebenprodukte der primären Kupferproduktionsroute ist in Abbildung 195 in einem Sankeydiagramm dargestellt.

Abbildung 195: Sankeydiagramm der wesentlichen Ressourcen und Reststoffe und Emissionen zur Herstellung einer Tonne Kupfer über die Primärroute.



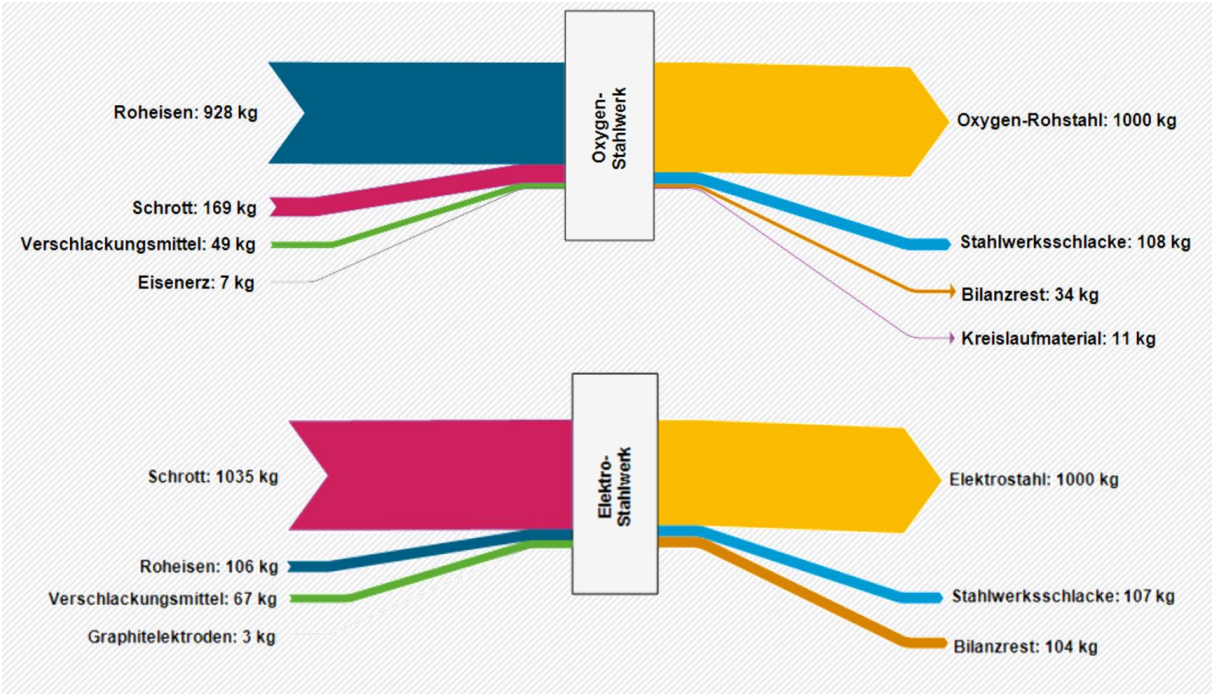
Quelle: Eigene Darstellung, KIT-ITC, nach Gilsbach (2020).

A.4.2 Vergleich der Massen- und Energieflüsse zwischen Primär- und Sekundärrouten der Metallherstellung

Im folgenden Abbildungen sind die Massen- und Energiedaten zur Herstellung der Metalle Stahl, Aluminium und Kupfer, jeweils über die Primärroute als auch über die Sekundärroute (Recycling) vergleichend dargestellt[19].

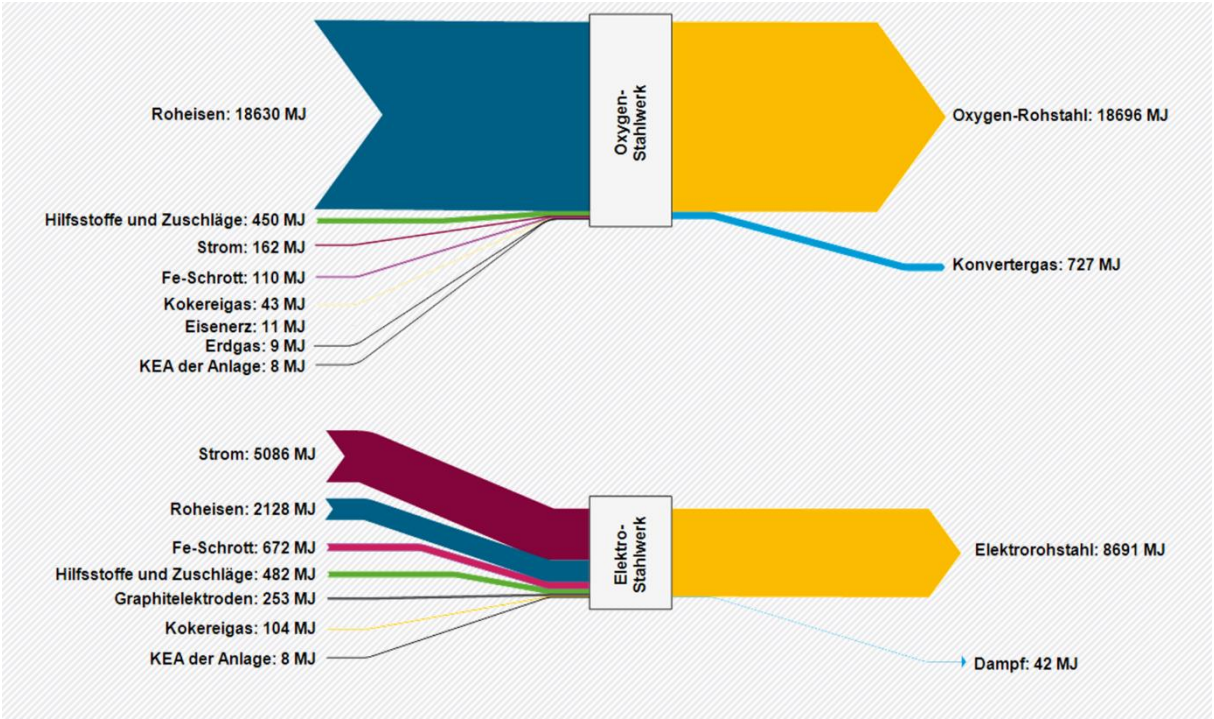
[19]Weitere Daten zu Transport und Aufbereitung der Einsatzstoffe sowie der Weiterverarbeitung der Produkte sind in der jeweils angegebenen Quelle zu finden.

Abbildung 196: Vergleichende Massenflussdiagramme der Stahlproduktion über die Hochofenroute (Oxygenstahlwerk) und das Recycling im Elektrolichtbogenofen (Elektrostahlwerk).



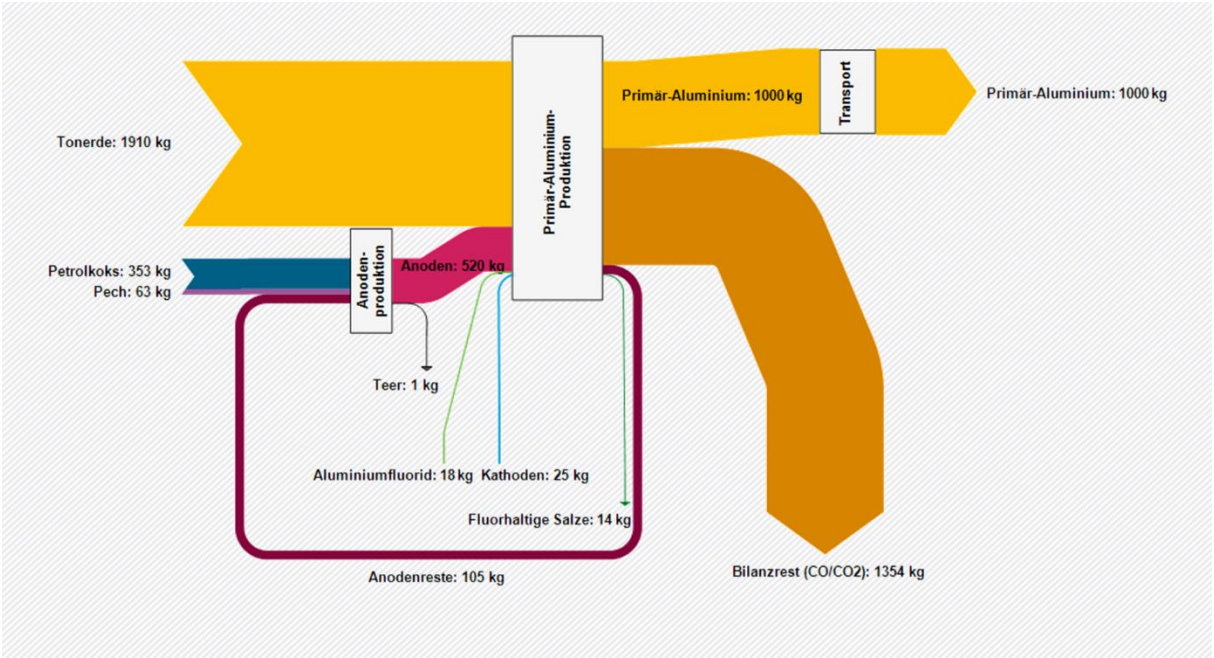
Quelle: Eigene Darstellung, KIT-ITC, nach Corradini et al. (1999).

Abbildung 197: Vergleichende Flussdiagramme des kumulierten Energieaufwandes der Stahlproduktion über die Hochofenroute (Oxygenstahlwerk) und das Recycling im Elektrolichtbogenofen (Elektrostahlwerk).



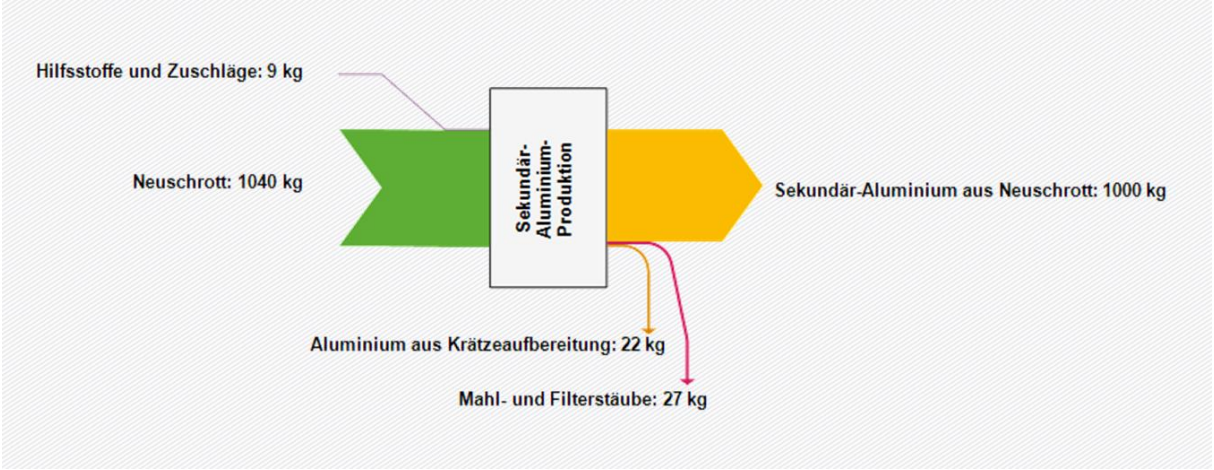
Quelle: Eigene Darstellung, KIT-ITC, nach Corradini et al. (1999).

Abbildung 198: Massenflussdiagramm der Aluminiumproduktion über die Primärroute



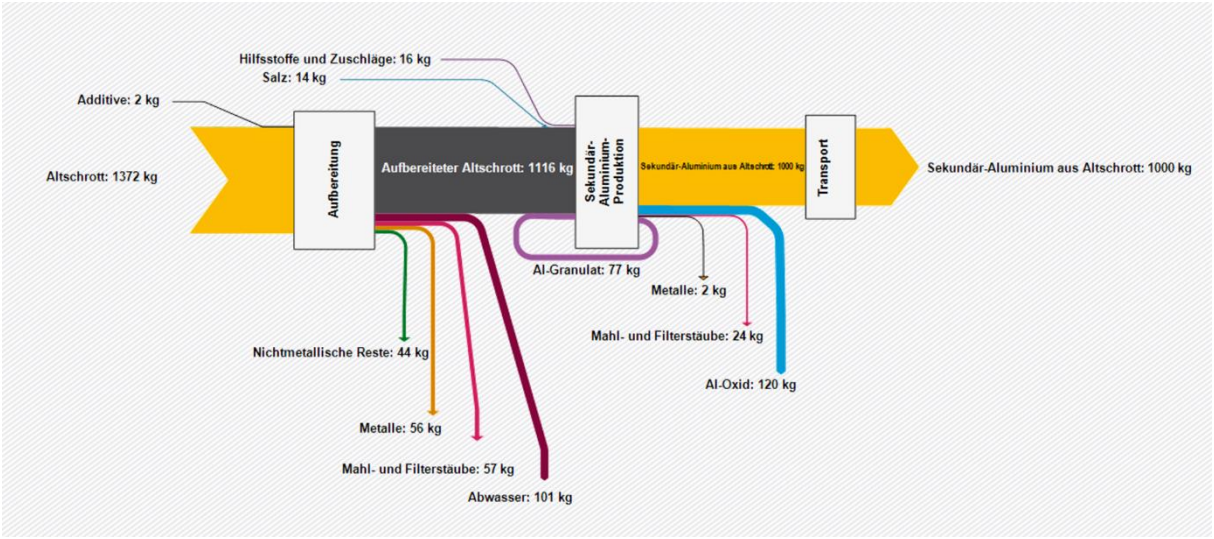
Quelle: Eigene Darstellung, KIT-ITC, nach Corradini et al. (1999).

Abbildung 199: Massenflussdiagramm der Aluminiumproduktion über das Recycling von Neuschrotten.



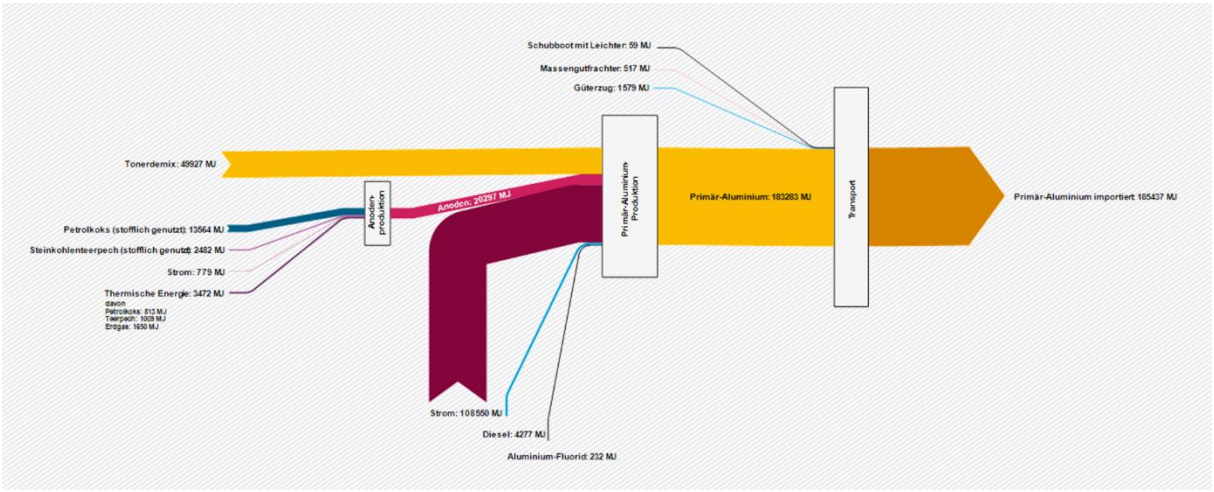
Quelle: Eigene Darstellung, KIT-ITC, nach Corradini et al. (1999).

Abbildung 200: Massenflussdiagramme der Aluminiumproduktion über Recycling von Altschrotten.



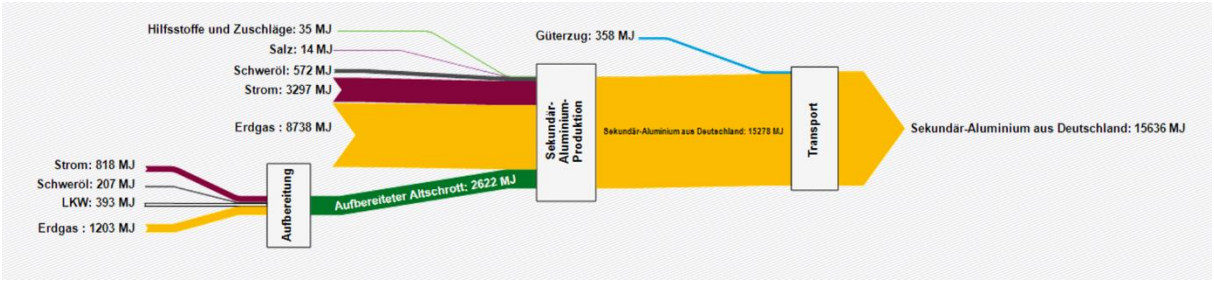
Quelle: Eigene Darstellung, KIT-ITC, nach Corradini et al. (1999).

Abbildung 201: Flussdiagramm des kumulierten Energieaufwandes der Aluminiumproduktion über die Primärroute.



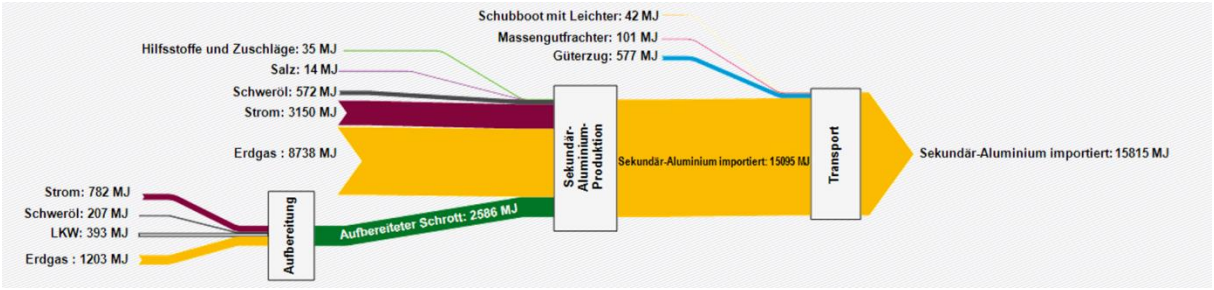
Quelle: Eigene Darstellung, KIT-ITC, nach Corradini et al.Carradini; Hutter; Köhler (1999).

Abbildung 202: Flussdiagramme des kumulierten Energieaufwandes des Recyclings im Inland.



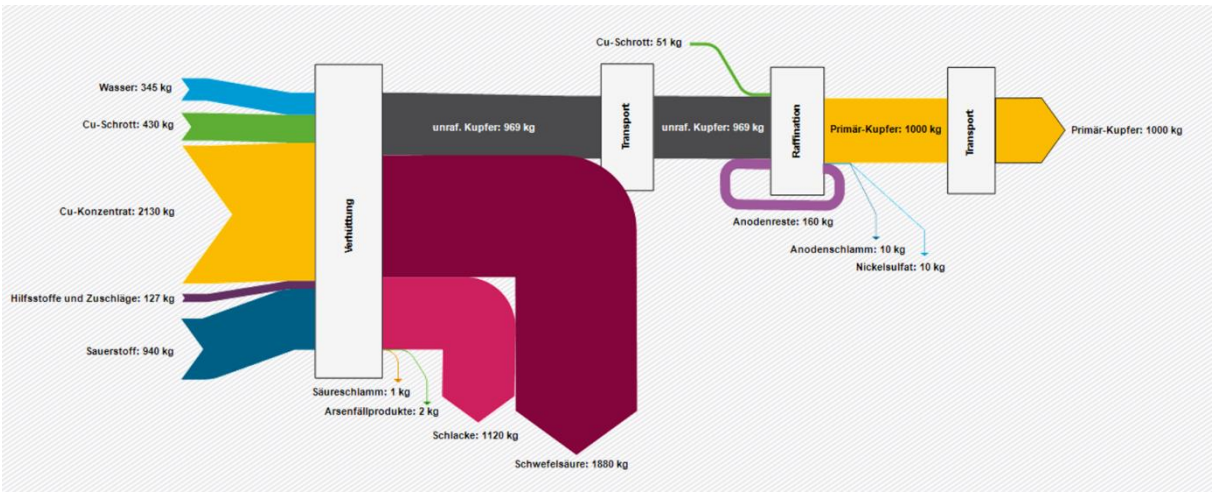
Quelle: Eigene Darstellung, KIT-ITC, nach Corradini et al. (1999).

Abbildung 203: Flussdiagramme des kumulierten Energieaufwandes des Recyclings nach Import.



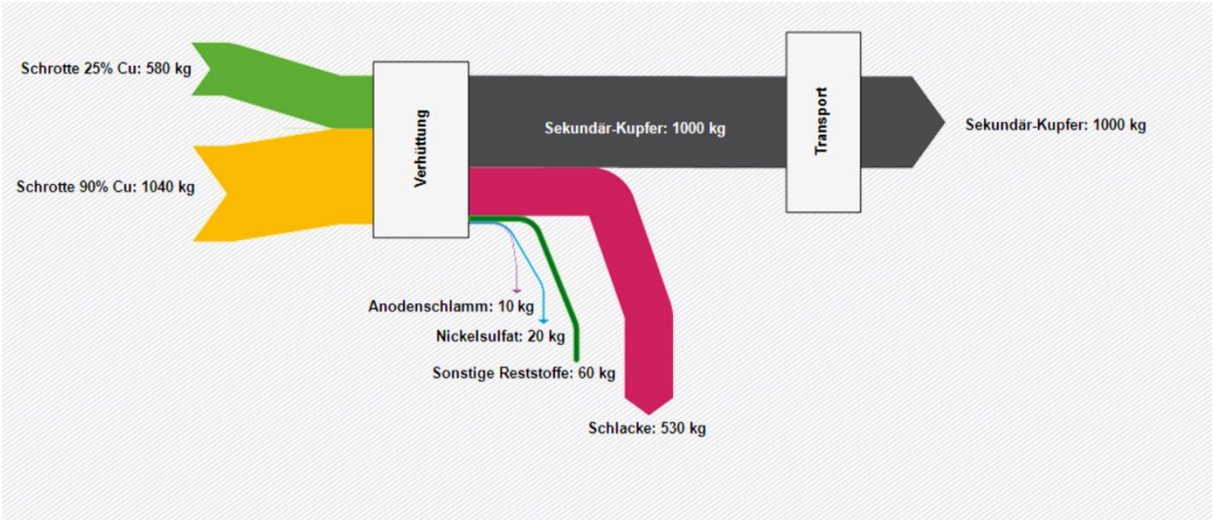
Quelle: Eigene Darstellung, KIT-ITC, nach Corradini et al. (1999).

Abbildung 204: Massenflussdiagramm der Kupferproduktion über die Primärroute.



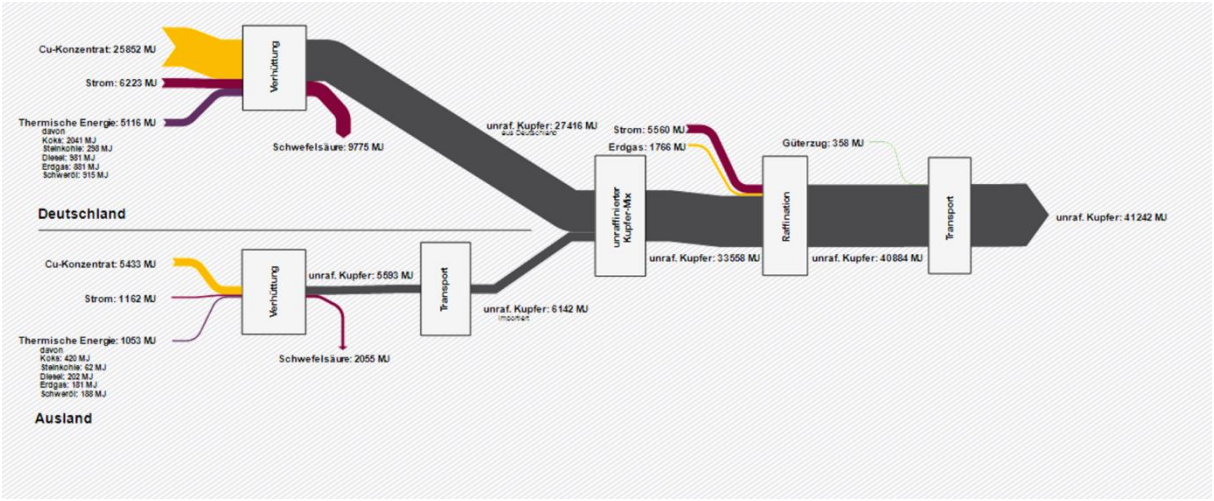
Quelle: Eigene Darstellung, KIT-ITC, nach Corradini et al. (1999).

Abbildung 205: Massenflussdiagramm der Kupferproduktion über das Recycling.



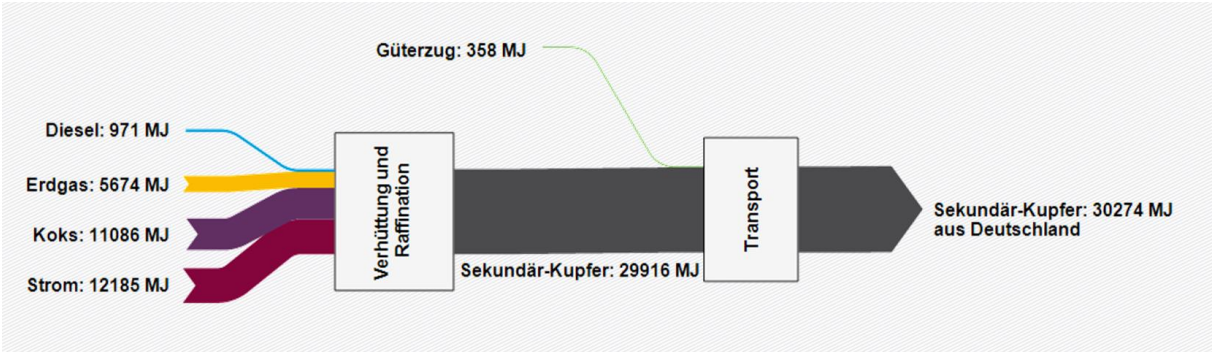
Quelle: Eigene Darstellung, KIT-ITC, nach Corradini et al. (1999).

Abbildung 206: Flussdiagramm des kumulierten Energieaufwandes der Kupferproduktion über die Primärroute.



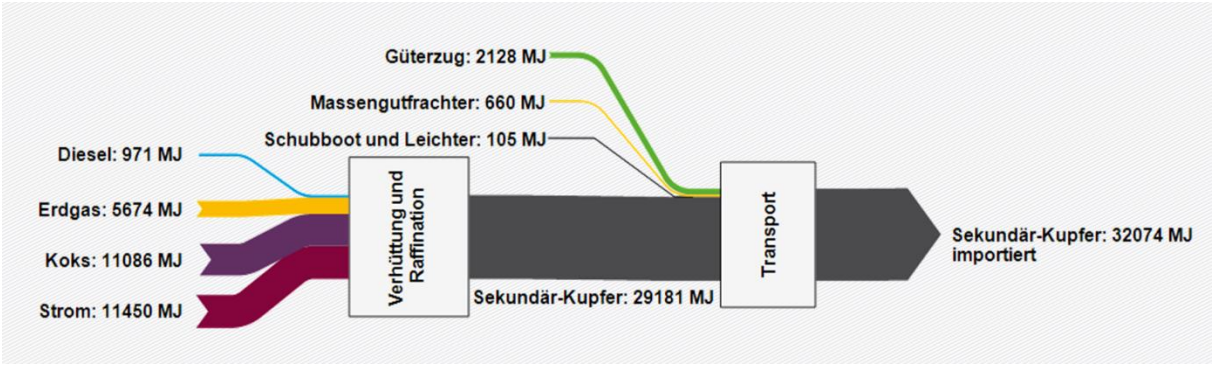
Quelle: Eigene Darstellung, KIT-ITC, nach Corradini et al. (1999).

Abbildung 207: Flussdiagramm des kumulierten Energieaufwandes der Kupferproduktion über das Recycling im Inland.



Quelle: Eigene Darstellung, KIT-ITC, nach Corradini et al. (1999).

Abbildung 208: Flussdiagramm des kumulierten Energieaufwandes der Kupferproduktion über das Recycling nach Import.



Quelle: Eigene Darstellung, KIT-ITC, nach Corradini et al. (1999).

A.4.3 Umgang mit prozessspezifischen Reststoffen beim Metallrecycling

Nachfolgend werden die bekannten Verfahren zur Weiterbehandlung prozessspezifischer Reststoffe in den verschiedenen Verwertungsprozessen materialspezifisch dargestellt.

► **Reststoffe beim Stahlrecycling**

Beim Stahlrecycling im Elektrolichtbogenofen fallen als Reststoffe hautsächlich Stäube und Schlacken an. Für diese Reststoffe gibt es Verwertungsverfahren nach dem Stand der Technik, sodass nur ein geringer Anteil deponiert werden muss (Martens und Goldmann 2016, S. 138).

Stäube

Im EAF fallen pro Tonne recyceltem Stahl etwa 12,5 kg Staub an (Velikorodov 2009). Dieser Staub wird meist mittels Elektrofiltern oder Gewebefiltern aus dem Abgas abgetrennt und nachfolgend verwertet. Dabei dient der Gewebefiltern neben der Entstaubung zusätzlich zur Minderung von PCDD/F[20], HCl und SO_2 (Umweltbundesamt (UBA) 2012). Zink- und eisenreiche Stäube unterscheiden sich deutlich von eher zinkarmen Stahlwerkstäuben (Tabelle 90).

Tabelle 90: Chemische Zusammensetzung von zinkreichem Feinstaub des Elektrolichtbogenofens sowie zinkarmen Stahlwerksstaub

Ofen	Zink* [%]	Eisen* [%]	Blei [%]	Chlor [%]	Fluor [%]	(Silicium*+ Calcium*+ Magnesium*) [%]	(Natrium*+ Kalium*) [%]
EAF	20 - 40	20 - 35	1,5 - 4	1 - 4	0,1 - 0,5	4,5 - 14,5	1 - 3,5
Stahlwerk[21]	15 – 20	40 – 50	1,5 - 4	1	-	8	1 – 2,3

Quelle: Eigene Zusammenstellung, KIT-ITC, gekürzt nach Martens und Goldmann (2016).

*) in Form von Oxiden.

Der hohe Zinkgehalt kann dabei auf verzinkte Schrotte zurückgeführt werden. Das Standardverfahren zur Verwertung solcher EAF-Staubes ist das Wälzverfahren. In diesem Prozess wird das Zinkoxid (ZnO) in einem Drehrohrofen reduziert, wobei das metallisch vorliegende Zink verdampft und im Abgas erneut zu ZnO oxidiert, wobei das entstehende Pulver mit einer Reinheit von etwa 93 % gewonnen werden kann. Dieses kann in Folgeprozessen, wie beispielsweise durch Laugung mit Schwefelsäure oder thermische Reduktion, zu metallischem Zink weiterverarbeitet werden. Neben dem ZnO wird im Drehrohrofen ebenfalls das im Staub enthaltene Eisenoxid (FeO) reduziert, welches in einer alkalischen Schlacke zurückbleibt. Am Ende des Ofens wird Sauerstoff auf die Schlacke geblasen und metallische Bestandteile erneut oxidiert. Die dabei freigesetzte Oxidationswärme wird zur Heizung des Feed-Stroms verwendet. Die zurückbleibende Schlacke wird im Straßenbau eingesetzt (Martens und Goldmann 2016).

Eisenoxidhaltige Reststoffe

Das meistverwendete Verfahren zur Verarbeitung eisenoxidhaltiger Reststoffe ist das fünfstufige DK-Verfahren[22]. Dabei werden zunächst eisenhaltige Reststoffe und Koksgrus zu einer Sintermischung verarbeitet und diese nachfolgend agglomeriert. Dieses Agglomerat wird im Hochofen mit Kalk und Koks eingeschmolzen, reduziert und dabei Roheisen gebildet. Anschließend werden in einem Induktionsofen die Legierungseinstellungen gewählt. Das bei

20Polychlorierte Dibenzodioxine / Dibenzofurane (PCDD/PCDF).

21Nach mehrfacher Rückführung in den Ofen.

22Benannt nach DK-Recycling und Roheisen GmbH, Duisburg.

diesem Prozess entstehende Gichtgas wird gereinigt und das CO kann zur Erzeugung von Heißwind genutzt werden. Mit diesem Verfahren ist es möglich eine Vielzahl eisenhaltiger Reststoffe zu verwerten. Allerdings ist das Verfahren durch aufwändige Vorbereitung der Abfälle (Bemusterung, Mischung, Sintern) und Verwendung von teuerem Hochofenkoks sowie Induktionsöfen sehr kostenintensiv. Induktionsöfen bieten jedoch den Vorteil, auch bei sehr unterschiedlichen Einsatzstoffen, durch Legierungseinstellung und Sekundärbehandlung ein hochwertiges Produkt herzustellen. Um die Wirtschaftlichkeit dieses Verfahrens zu gewährleisten ist ein Eisengehalt von mind. 30 % Voraussetzung für das DK-Verfahren (Martens und Goldmann 2016).

Sonstige Abfälle

Eisenhaltige Reststoffe, die nicht mit den oben beschriebenen Verfahren verwertet werden können, werden als Zusätze bei der Zementherstellung oder als Eisenoxidschlacken in der Baustoffherstellung eingesetzt (Wirtschaftsvereinigung Stahl 2020b; Martens und Goldmann 2016). Dies gilt ebenfalls für eisenhaltige Abfallprodukte aus anderen Metallproduktions-prozessen (z. B. Kupfer- oder Aluminiumrecycling), welche einen zu geringen Eisengehalt aufweisen, um mit dem DK-Verfahren verarbeitet zu werden (Martens und Goldmann 2016).

Ein geringer Anteil der anfallenden Reststoffe kann nicht verwertet werden. Hierzu gehören feine Stäube und Schlämme aus der Abgasreinigung, Feuerfestausbruch der Öfen, Stäube aus Elektrofiltern oder Gewebefiltern (wenn diese einen hohen Gehalt an Alkalichloriden und Schwermetallchloriden enthalten) und ggfs. feine Stäube aus der Wäsche des Konvertergases. Aufgrund ihrer geringen Korngröße werden diese üblicherweise in Untertagedeponien gelagert und gehören damit der Deponieklasse IV an (Umweltbundesamt (UBA) 2012).

► Reststoffe beim Aluminiumrecycling

Beim Recycling von Aluminiumschrotten können Reststoffe in Form von Krätzen, Salzschlacken, Stäuben und Ofenausbrüchen auftreten. Bei der Krätze handelt es sich um feste, aluminiumhaltige Reststoffe, die durch Oxidation in Aluminiumschmelzen anfallen. Zusätzlich können darin Aluminiumoxid, Spinelle, Silikate, Metalloxide, Chloride und Fluoride enthalten sein. Schlacken sind nicht-metallische Rückstände aus Verbrennungsprozessen, die flüssig in der Schmelze vorliegen. Bei Ofenausbrüchen handelt es sich um Teile der Ofenauskleidung, die sich bei hohen Schmelztemperaturen von der Ofenwand lösen (Antrekowitsch et al. 2013). Eine Übersicht der anfallenden spezifischen Mengen und zum Umgang mit diesen Stoffen ist in Tabelle 91 aufgeführt.

Tabelle 91: Zusammenstellung zu Mengen, Vermeidung und Verwertung verschiedener Reststoffe aus dem Aluminiumrecycling sowie deren Umweltrelevanz.

	Salzschlacke	Filterstaub	Ofenausbruch	Krätze
Anfall [kg/t_{Alu}]	300 - 500	10 - 40	2 - 3	20 - 30
Anfallstelle	Schmelzen im Drehtrommelofen	Abgasreinigung Drehtrommel- u. Warmhalteofen	Drehtrommel- u. Warmhalteofen	Schmelzreinigung, Gießerei
Verringerung/ Vermeidung	Möglich	Kaum möglich	Nicht möglich	Kaum möglich
Umwelt-relevanz	Gasbildung, Eluierbarkeit	Eluierbarkeit	Eluierbarkeit	Gasbildung, Eluierbarkeit

	Salzschlacke	Filterstaub	Ofenausbruch	Krätze
Verwertung	Lösekristallisations-verfahren	Lösekristallisations-verfahren	-	Krätzeaufbereitung, Schmelzprozesse
Beseitigung	Deponieverbot	Untertagedeponie	Deponie	Deponieverbot

Quelle: Eigene Zusammenstellung, KIT-ITC, nach Antrekowitsch et al. (2013).

Für die verschiedenen Reststoffe aus der Sekundäraluminiumproduktion gibt es nach dem Stand der Technik teilweise Verwertungsverfahren, wie das B.U.S.- / IME-Verfahren, allerdings sind die Kosten hierfür deutlich höher als für eine Deponierung, weshalb meist diese Lösung gewählt wird (Antrekowitsch et al. 2013).

Aluminiumkrätze

Die anfallende Krätze kann je nach Geometrie weiter unterteilt werden, wobei sich die einzelnen Fraktionen deutlich im Aluminiumgehalt unterscheiden (Tabelle 92).

Tabelle 92: Chemische Zusammensetzung von verschiedenen Aluminiumkrätzen.

Fraktion	Anteil metallisches Aluminium [%]
Unaufbereitete Krätze	< 80
Brocken und Fladen	< 90
Krätzegröbe	70 - 50
Krätzerückstand	50 - 20
Krätzestaub	< 20
Sonstige Bestandteile in allen Fraktionen:	Al_2O_3, $Al_2O_3 \cdot MgO$, $Al_2O_3 \cdot SiO_2$, $Al_2O_3 \cdot FeO$, usw. $AlCl_3$, NaCl, KCl, usw. CaF_2, NaF, AlF_3, usw.

Quelle: Eigene Zusammenstellung, KIT-ITC, nach Antrekowitsch et al. (2013).

Nach Stand der Technik gibt es Verfahren zur Aufbereitung von Krätze, z. B. mittels Schwefelsäure, wobei die Aluminium-Ionen gelöst werden und Oxid-Ionen protoniert werden (Antrekowitsch et al. 2013). Krätzegröbe wird oft zu den Aluminiumschmelzen in den Refinern (Schmelzhütten) zugegeben und mithilfe von Salzschlacken aufgearbeitet (Martens und Goldmann 2016; Antrekowitsch et al. 2013).

Salzschlacke

Die Schmelzsalze werden aufgrund der hohen Sauerstoffaffinität von Aluminium eingesetzt, um die Oxidation des Aluminiums und den damit einhergehenden Metallverlust zu verringern (Antrekowitsch et al. 2013). Abhängig von der Menge des zugegebenen Schmelzsalzes fällt Salzschlacke in flüssiger Form (hoher Salzgehalt) oder Salzkuchen in einer pulverig-krümeligen Form (geringer Salzgehalt) an (Boin et al. 2000). Die Zusammensetzung der dabei anfallenden Reststoffe ist abhängig von Art und Material des Aluminiumschrotts und des eingesetzten Schmelzsalzes. Ein Überblick über die chemische Zusammensetzungen ist in Tabelle 93 dargestellt (Antrekowitsch et al. 2013).

Tabelle 93: Zusammensetzung von Salzschlacke (flüssige Rückstände) und Salzkuchen (feste Rückstände) aus Aluminiumschmelzen.

Bestandteil	Schlacke [Gew.-%]	Schlacke [Gew.-%]	Schlacke [Gew.-%]	Kuchen [Gew.-%]	Kuchen [Gew.-%]	Kuchen [Gew.-%]
NaCl	40 - 50	45 - 75	62,9	49,5	23,2[1)]	20 - 80
KCl	18 - 20	45 - 75	62,9	10,4	23,2[1)]	20 - 80
Andere Chloride	< 10	45 - 75	-			
Al2O3, SiO2·Al2O3, SiO2, MgO·Al2O3 und andere komplexe Oxide und Hydroxide	20 - 25	20 - 40	28	61,3	67,8	20 - 60
CaF2	1 - 2	20 - 40	1,6	-	0,7[1)]	-
Almet	4 - 10	5 - 20	7,5	k. A.	8,1	3 - 10
PCDD/F	20 ng ITE[2)]/kg	-	-	-	-	-

Quelle: Eigene Zusammenstellung, KIT-ITC, nach Antrekowitsch et al. (2013).[23]

Die Salzschlacke setzt sich aus Aluminium, Aluminiumoxid, Spinellen, Silikaten, Chloriden, Fluoriden und verschiedenen Metall-Oxiden zusammen(Antrekowitsch et al. 2013) und deren Lagerung stellt ein Gefährdungspotential für Natur und Umwelt dar, da die enthaltenen Chloride wasserlöslich sind und somit in das Grundwasser gelangen können. Zudem können giftige und explosive Gase wie H_2, CH_4, NH_3, H_2S, PH_3 bei Kontakt mit Wasser bzw. Feuchtigkeit entstehen (Capuzzi und Timelli 2018; Antrekowitsch et al. 2013). Daher wird Salzschlacke als giftiger und gefährlicher Abfall eingestuft und es besteht ein Deponieverbot (Capuzzi und Timelli 2018). Aus diesem Grund muss Salzschlacke aufgearbeitet werden, beispielsweise entsprechend folgenden Prozessschritten (Martens und Goldmann 2016):

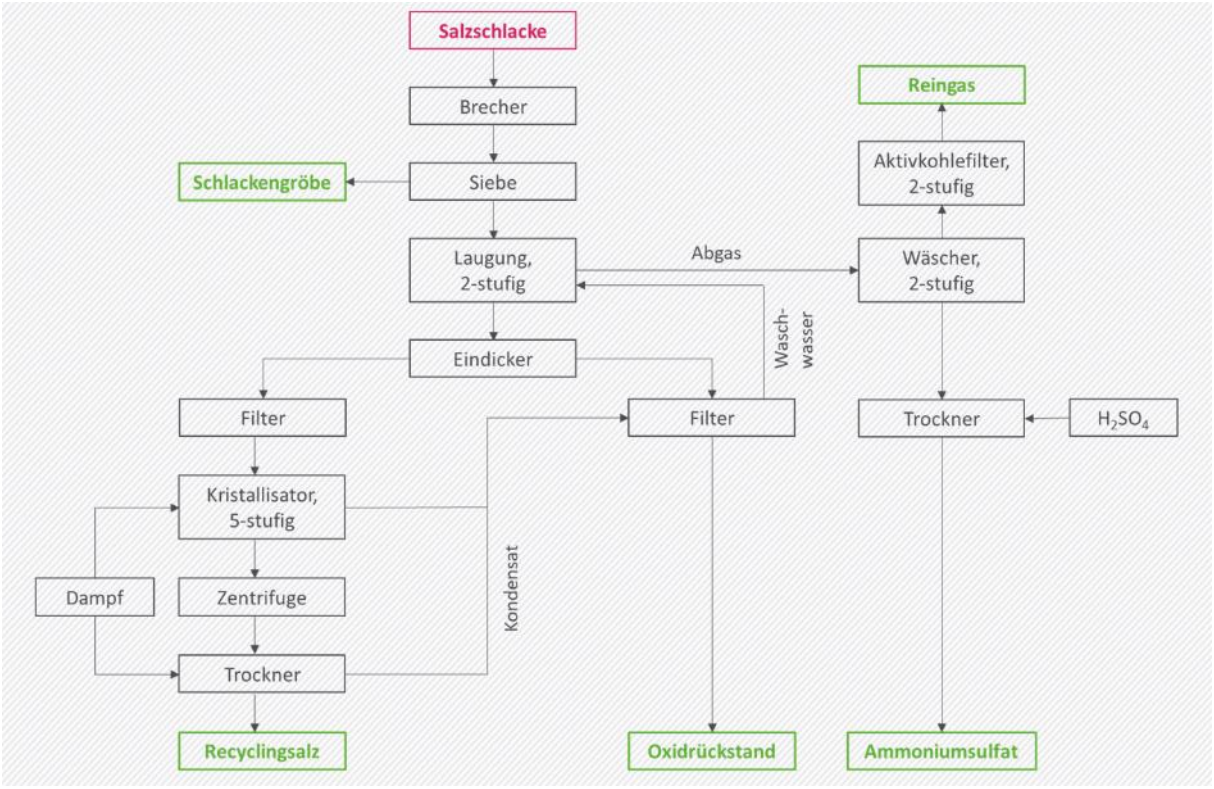
1. Wasserlaugung zur Auflösung und Kristallisation der Salze, inkl. notwendiger Abgasnachbehandlung, da Gemische aus H_2, CH_4, NH_3 und PH_3 entstehen
2. Fest-Flüssig-Trennung von Oxidrückständen (ca. 30 % der Schlacke)
3. Abdampfen[24] der Lauge und Kristallisation von Alkalichloriden, wobei Recyclingsalz zurück bleibt, welches in den Schmelzprozess zurückgeführt werden kann.

Nach dem Stand der Technik gibt es weitere Verfahren zur Aufbereitung von Salzschlacken, wie z. B. das Berzelius-Umwelt-Service (B.U.S.)-Verfahren (Abbildung 209), bei dem die Salzschlacke in einem mehrstufigen Verfahren aufbereitet wird (Antrekowitsch et al. 2013).

[23] [1)]Angaben von Cl und F; [2)] Internationales Toxizitätsäquivalent

[24] Chemisches Verfahren, bei dem eine Lösung erhitzt wird, um das Lösungsmittel vollständig von der gelösten Substanz zu trennen. Die gewünschte Substanz bleibt dabei als Feststoff zurück.

Abbildung 209: Schematische Darstellung der Aufbereitung von Salzschlacken aus dem Aluminiumrecycling nach dem B.U.S.-Verfahren.



Quelle: Eigene Darstellung, KIT-ITC, nach Antrekowitsch et al. (2013).

Bei der Aufbereitung von Salzschlacke nach dem B.U.S.-Verfahren fallen folgende Produkte und Abfälle an (Boin et al. 2000; Antrekowitsch et al. 2013):

- Schlackengröbe (Aluminium-Granulat): enthält ca. 80 % Aluminium und wird in den Schmelzprozess zurückgeführt
- Recyclingsalz: wird in Schmelzprozess in Drehtrommelöfen zurückgeführt
- Oxidrückstände (Tonerde Rückstand): werden als Al_2O_3-Träger in der Zementindustrie eingesetzt
- Ammoniumsulfat: wird in der Düngemittelproduktion eingesetzt

Stäube

Die beim Aluminiumrecycling anfallenden Stäube lassen sich in Aufbereitungs- und Filterstäube einteilen. Die Aufbereitungsstäube entstehen bei der Vorbehandlung des Aluminiumschrotts, z. B. bei der Zerkleinerung und enthalten metallisches Aluminium, Aluminiumoxid, organische Verbindungen und Kohlenstoff, wobei diese meist deponiert.

Die Filterstäube hingegen entstehen während des Schmelzprozesses und der Abgasnachbehandlung (Martens und Goldmann 2016; Antrekowitsch et al. 2013), wobei die Zusammensetzung der Filterstäube abhängig ist von den Einsatzmaterialien, dem Schmelzverfahren sowie der Abgasbehandlungstechnik (Tabelle 94). Bei diesen Prozessen ist eine Bildung von polychlorierten Dibenzodioxinen/-furanen (PCDD / PCDF), polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK) und polychlorierten Biphenylen (PCB) möglich.

Tabelle 94: Chemische Zusammensetzung von Filterstaub bei Aluminiumrecycling.

Chemische Bestandteile	[Gew-%]	Mineralogische Bestandteile	[Gew-%]
Al_{gesamt}	2,6 - 17,7	$Ca(OH)_2$	14 - 24
Al_{met}	4,0 - 9,0	NaCl	15 - 18
Cl	16,2 - 36,6	Al_2O_3	9 - 13
Ca	2,4 - 25,4	KCl	9 - 10
Na	5,6 - 14,6	$CaSO_4$	8 - 10
K	3,8 - 9,9	$CaCl_2$, $CaCl_2 \cdot Ca(OH)_2 \cdot H_2O$	5 - 10
F	0,4 - 8,0	SiO_2	3 - 7
Fe	0,5 - 6,3	CaF_2	4 - 5
C	1,8 - 6,2	PCDD/F	5000 - 40 000 ng ITE[1)]/kg
Si	1,3 - 3,1		
S	0,7 - 2,7		
Mg	1,5 - 1,8		
Zn, Pb	0,01 - 1,3		
Cu	0,01 - 0,7		
Ni	0,001 - 0,03		
Cd	< 0,001 - 0,02		
Cr, As, Hg	< 0,001		

Quelle: Eigene Zusammenstellung, KIT-ITC, nach Antrekowitsch et al. (2013).[25]

Daher zählen die Filterstäube zu den überwachungspflichtigen Abfällen und werden aktuell auf Sonderdeponien, bzw. Untertagedeponien, gelagert (Capuzzi und Timelli 2018; Antrekowitsch et al. 2013). Eine Verwertung dieser Stäube wäre mit verschiedenen Verfahren, wie z. B. dem B.U.S-IME[26]- oder UR[27]-Chemie-Verfahren möglich, allerdings sind sie derzeit nicht wirtschaftlich betreibbar, weshalb auf die Deponierung zurückgegriffen wird (Antrekowitsch et al. 2013). Eine weitere Möglichkeit zur Verwertung von Filterstaub ist das Beimengen zum Entschwefelungsmittel ($CaO\text{-}CaF_2\text{-}Al_2O_3$) in der Stahlindustrie (Martens und Goldmann 2016; Antrekowitsch et al. 2013). Weiterhin wird an der Herstellung eines hydratalkaliähnlichen Materials zur Anbindung schwermetallhaltiger Partikel aus wässrigen Lösungen gearbeitet. Dieses Material weist eine gute Adsorptionswirkung auf, wodurch es gut zur Abwasserreinigung geeignet ist, das Verfahren aber bisher noch nicht kommerziell genutzt wird (Murayama et al. 2006).

Ofenausbrüche

Feuerfest- bzw. Ofenausbrüche sind nichtmetallische keramische Materialien mit hohen Schmelztemperaturen sowie hoher korrosiver und erosiver Toleranz. Der Wiedereinsatz dieser

[25] 1)Internationales Toxizitätsäquivalent.

[26] Verfahren des Instituts für Metallurgische Prozesstechnik und Metallrecycling der RWTH-Aachen.

[27] Modifiziertes IME-Verfahren Paulitsch 2012.

Stoffe ist nicht möglich, da die Materialeigenschaften durch hohe Temperaturen, chemische Reaktionen und Verunreinigungen verändert wurden. Bisher wurden kaum Aufbereitungsverfahren für Ofenausbrüche entwickelt, weshalb diese Reststoffe meist deponiert werden (Antrekowitsch et al. 2013).

Der Einsatz des Materials zur Herstellung von Ofenspritzmassen wäre möglich, detaillierte Angaben stehen allerdings nicht zur Verfügung. In geringem Maße wird Ofenausbruch analog zur Krätze aufgearbeitet (Boin et al. 2000) und weitere Möglichkeiten wären die Zugabe von Ofenausbrüchen in der Baustoffindustrie oder im Straßenbau (Antrekowitsch et al. 2013).

► Reststoffe beim Kupferrecycling

Durch den edlen Charakter von Kupfer werden viele Reststoffe auch mit geringen Kupfergehalten aufgearbeitet und verwertet, wobei zu diesen Reststoffen Schlacken, Stäube, Krätzen bzw. oxydische Verbindungen und Schlämme gehören (Steinacker et al. 2015), die sich hinsichtlich der Kupfergehalte deutlich voneinander unterscheiden können (Tabelle 95). Zur Aufbereitung werden diese unter reduzierenden Bedingungen geschmolzen, konvertiert und raffiniert (Worrel und Reuter 2014).

Tabelle 95: Reststoffe des Kupferrecyclings und deren Kupfergehalte.

	Schlacken	Krätzen	Schlämme	Stäube
Kupfergehalt [%]	5 – 50	10 – 50	1 – 40	1 - 30

Quelle: Eigene Zusammenstellung, KIT-ITC, nach Steinacker et al. (2015).

Schlacken und Schlämme

Oxydische Abfälle wie Kupferoxide, Krätzen, Schlacken, Aschen und Schlämme mit Kupfergehalten von bis zu 50 % können den in Kapitel 6.5.3.1.1 beschriebenen Konzentrationsschmelzen zugeführt werden (Martens und Goldmann 2016; Deutsches Kupferinstitut). Konverterschlacken und Schlacken aus den Anodenöfen werden ebenfalls zu den Konzentrationsschmelzen rückgeführt (Agrawal und Sahu 2010; Martens und Goldmann 2016). Übliche Konverterschlacken setzen sich wie folgt zusammen:

Tabelle 96: Chemische Zusammensetzung der Konverterschlacken des Kupferrecyclingprozesses.

Kupfer [%]	Eisen [%]	Zinn [%]	Nickel [%]	Blei [%]	Zink [%]
20 - 30	18	9	5	5	2

Quelle: Eigene Zusammenstellung, KIT-ITC, nach Martens und GoldmannMartens und Goldmann (2016).

Neben den Konverterschlacken können während des Konverterprozesses Zinn-Blei-Schlacken anfallen. Diese werden reduziert und zu Zinn-Blei-Legierungen verarbeitet. Falls diese Schlacken zusätzliches Zink enthalten, wird dieses in Form von ZnO-Staub abgeführt und verwertet (Martens und Goldmann 2016; Thome-Kozmiensky 2015). Der Anodenschlamm der elektrolytischen Raffination wird in einem zusätzlichen Prozess aufbereitet und enthaltene Edelmetalle sowie enthaltenes Selen und Tellur rückgewonnen (Agrawal und Sahu 2010; Martens und Goldmann 2016). Der Anodenschlamm wird dabei in einem mehrstufigen Prozess aufbereitet und die Edelmetalle mittels verschiedener Elektrolyseprozesse voneinander getrennt (Martens und Goldmann 2016). Kupferschlacken, deren Kupfergehalt zu gering ist um

aufbereitet zu werden, werden ausreduziert und im Straßenbau, in der Zementindustrie oder zur Herstellung von Schneide- und Schleifwerkzeugen verwendet (Thome-Kozmiensky 2015).

Stäube

Die in den verschiedenen Prozessschritten anfallenden Stäube werden üblicherweise den Konzentrationsschmelzen (Kapitel 6.5.3.1.1) zugeführt oder hydrometallurgisch aufbereitet. Ausgenommen davon sind die ZnO-Filterstäube, welche getrennt aufbereitet werden (Thome-Kozmiensky 2015). Diese Stäube bestehen aus verschiedenen Metalloxiden, deren Konzentrationen von den einsetzten Schrotten und dem jeweiligen Prozessschritt abhängen (Tabelle 97).

Tabelle 97: Chemische Zusammensetzung der ZnO-Filterstäube aus den Prozessstufen des Konzentrationsschmelzens und des Konverters beim Kupferrecycling.

	Zink [%]	Blei [%]	Zinn [%]	Kupfer [%]
Konzentrationsschmelzen	20 - 60	5 - 50	0,2 - 5	2 - 12
Konverter	25 - 70	5 - 30	1 - 20	2 - 15

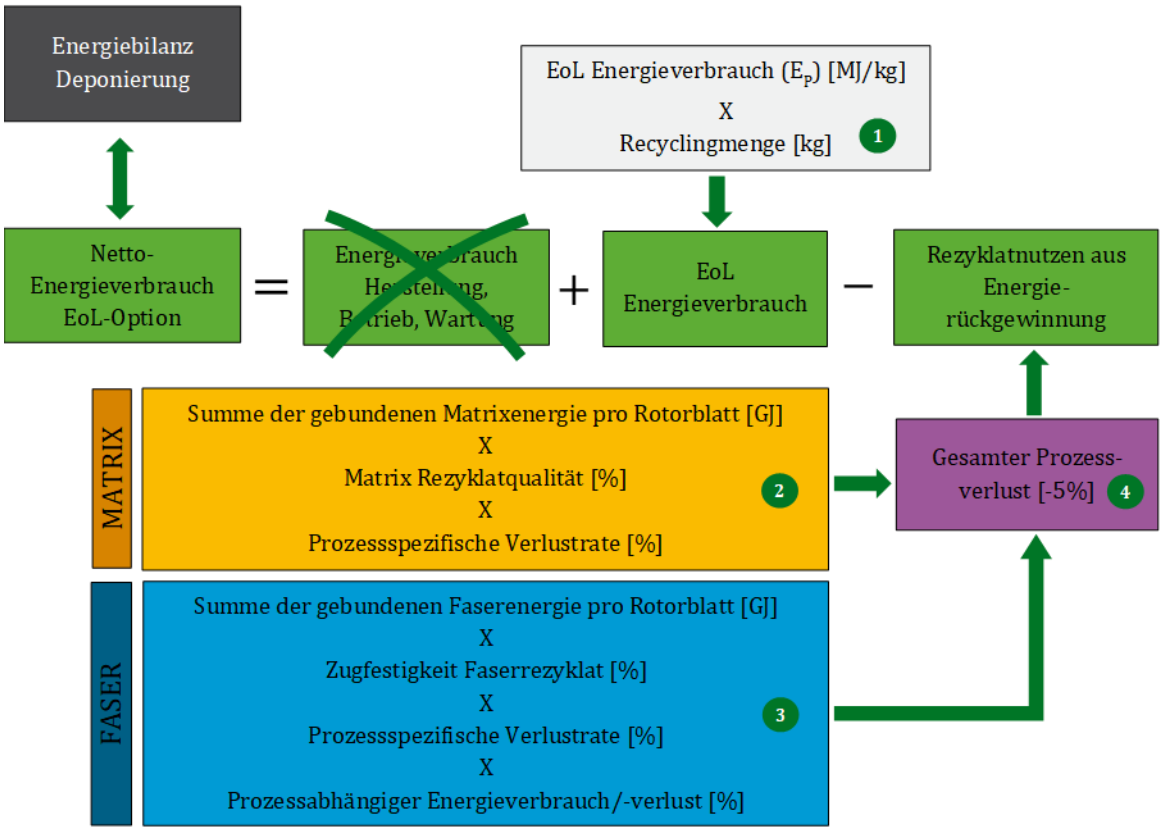
Quelle: Eigene Zusammenstellung, KIT-ITC, nach Martens und Goldmann (2016).

Die Verarbeitung der ZnO-Stäube erfolgt über eine selektive Laugung mit Schwefelsäure. Dabei gehen ZnO und Kupferoxid als Sulfate in Lösung, während ein Rückstand aus Blei(II)-Sulfat ($PbSO_4$) und Zinn(IV)-Oxid (SnO_2) ausfällt. Anschließend wird die Lösung filtriert und aus dem Filtrat die Kupfer-Ionen durch Zementation mit Zinkstaub entfernt. Über eine Verdampfungs-kristallisation wird aus der verbleibenden Zinksulfat-Lösung kristallines Zinksulfat gewonnen.

A.4.4 Eco-Audit-Modell Rotorblatt Recycling

Der EoL-Energieverbrauch setzt sich aus dem Produkt von spezifischem EoL-Energieverbrauch (E_P) und der Menge an recyceltem Material zusammen (vgl. Abbildung 210, Nr.1). Der Rezyklatnutzen ist aus energetischer Sicht vereinfacht durch die Summe an Energie definiert, die benötigt wird, um sowohl die recycelte Matrix (vgl. Abbildung 210, Nr.2), als auch die recycelte Faser in der entsprechenden Qualität herzustellen. Ähnlich der ökonomischen Bewertung des Faserrezyklats nach (Hagnell et al. 2019) beschreibt (Liu et al. 2019) den Faser-Rezyklatnutzen direkt proportional zur Zugfestigkeit des Faserrezyklats (vgl. Abbildung 210, Nr.3). Um stoffliche und energetische Verluste hinreichend zu berücksichtigen, setzt dieses Eco-Audit konservativ sowohl prozessspezifische Verlustraten in der Erzeugung des Faser- sowie des Matrixrezyklats an und erhöht diese zusätzlich noch um weitere 5 % (vgl. Abbildung 210, Nr.4).

Abbildung 210: Berechnung des Netto Energieverbrauchs eines Rotorblatts über seinen Lebenszyklus.



Quelle: Eigene Darstellung, KIT-IIP, nach Liu et al. (2019).

Da für den vereinfachten bilanziellen Vergleich unterschiedlicher EoL-Optionen und zugehöriger Prozesspfade die Energieverbräuche aus den vorherigen Lebenszyklusphasen der Herstellungs- und Betriebsphase von Rotorblättern als identisch angenommen werden, könnte das Eco-Audit Modell von Liu et al. (2019) durch Wegstreichen der Herstellungs- und Betriebsphase zur Berechnung der Nettoenergiebilanz in Ahnlehnung an den von Nakatani (2014) beschriebenen „Zero Burden Approach“ vereinfacht werden.
Für die ökobilanzielle Betrachtung zukünftiger Materialkreisläufe von Faserverstärkten Kunststoffen (FVK) stellt z. B. der „Avoided Burden Ansatz“ eine Möglichkeit dar. Durch diese Erweiterung der Systemgrenzen und Allokation der prozessbedingten Energie- und Materialströme kann die stoffliche Substitution von Primärrohstoffen durch erzeugte Sekundärrohstoffe bilanziell berücksichtigt werden.