

TEXTE

112/2026

Abschlussbericht

Stand der Technik von Direkt- trocknungsanlagen

**in den Bereichen Abfall, Asphaltherstellung,
Trockengrünerzeugung und Zuckerrübentrocknung**

von:

Pitt Götze, Philipp Pietsch, Marcus Wiersig
DBI Gas- und Umwelttechnik GmbH, Leipzig

Herausgeber:
Umweltbundesamt

TEXTE 112/2026

REFOPLAN des Bundesministeriums Umwelt,
Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz

Forschungskennzahl 3719 53 302 3

Abschlussbericht

Stand der Technik von Direkttrocknungsanlagen

in den Bereichen Abfall, Asphaltherstellung,
Trockengrünerzeugung und Zuckerrübentrocknung

von

Pitt Götze, Philipp Pietsch, Marcus Wiersig
DBI Gas- und Umwelttechnik GmbH, Leipzig

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

Durchführung der Studie:

DBI Gas- und Umwelttechnik
Karl-Heine-Straße 109/111
04229 Leipzig

Abschlussdatum:

Juni 2023

Redaktion:

Fachgebiet III 2.1 Übergreifende Angelegenheiten, Chemische Industrie, Feuerungsanlagen
Dr. Lukas Ahrem

DOI:

<https://doi.org/10.60810/openumwelt-7783>

ISSN 1862-4804

Dessau-Roßlau, Juli 2026

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

Kurzbeschreibung: Stand der Technik von Direkttrocknungsanlagen

Das Forschungsprojekt „Stand der Technik von Direkttrocknungsanlagen“ untersucht die aktuellen Entwicklungen und Technologien in diesem Bereich.

Erarbeitung rechtlicher Grundlagen

Eine zentrale Aufgabe ist die Erarbeitung der rechtlichen und normativen Grundlagen durch die Recherche deutscher und europäischer Regelungen für Trocknungsanlagen.

Eingrenzung des Themas

Direkttrocknungsanlagen finden sich in einer Vielzahl von Anwendungsbereichen. Um das Forschungsprojekt zielgerichtet durchzuführen, erfolgte in Rücksprache mit dem Auftraggeber eine Eingrenzung der Anwendungsgebiete auf:

- ▶ Abfallnachbehandlung
- ▶ Asphaltherstellung
- ▶ Holzwerkstoffherstellung (Spanplatten, OSB-Platten, Faserplatten)
- ▶ Trockengrünherstellung
- ▶ Zuckerrübenschnitzeltrocknung

Aufgrund von Problemen bei der Implementierung der BVT-Schlussfolgerungen, der verfügbaren Datenbasis und wirtschaftlichen Signifikanz der Branche, wird der Berichtsteil für die Holzwerkstoffindustrie separat veröffentlicht.

Erarbeitung des Stands der Technik

Die Erfassung des Stands der Technik von Trocknungsanlagen und der Abgasnachbehandlung erfolgt durch Literaturrecherche, Datenanalyse und Experteninterviews. Ein Vergleich zu indirekt arbeitenden Trocknungsverfahren ist, wenn möglich, vorgesehen. Ziel ist die Sammlung umfassender Daten zu den in Deutschland betriebenen Anlagen. Diese Daten umfassen die bauliche Ausführung der Anlagen, verwendete Brennstoffe, Ressourcen- und Energieverbräuche sowie eingesetzte Abgasreinigungsverfahren. Zusätzlich werden Abgaszusammensetzung, Emissionsprofile und Betriebsweisen der Anlagen analysiert. Informationen und Daten von Anlagenbetreibern, Behörden und Verbänden ergänzen diese Übersicht und zeichnen ein praxisnahes Bild der aktuellen Situation.

Identifizierung von Optimierungspotentialen der Direkttrocknungsanlagen

Ein weiterer Aspekt des Projekts umfasst die Identifizierung von Möglichkeiten zur Emissionsminderung der Trocknungsverfahren bzw. der Prozesse an sich. Hierbei erfolgt eine Untersuchung, wie und ob die Prozesse verbessert und Trocknungsverfahren auf treibhausgasneutrale Methoden umgestellt werden können. Besonderes Augenmerk liegt auf dem Ersatz fossiler Brennstoffe durch umweltfreundliche, regenerative Energiequellen.

Abstract: State of the Art of Direct Drying Systems (DDS)

The research project 'State of the art of direct drying systems' examines current developments and technologies in this area.

Development of the legal basis

A central task is the analysis of the legal and normative basis by researching German and European regulations for drying systems.

(Re-) Defining the research topic

Direct drying systems can be found in a variety of application areas. In order to carry out the research project in a targeted manner, the areas of application were narrowed down in consultation with the client:

- ▶ Waste treatment
- ▶ Asphalt production
- ▶ Wood-based material production (chipboard, OSB boards, fibreboard)
- ▶ Dry green production
- ▶ Sugar beet pulp drying

Due to some issues with the implementation of BAT conclusions, available database and economic significance of the wood-based materials industry, it will be analysed in detail in a separate report.

Development of the state of the art of direct drying systems

The state of the art of drying systems and flue gas treatment is determined by literature research, data analysis and expert interviews. Where possible, a comparison with indirect drying processes is planned. The aim is to collect comprehensive data on the plants operated in Germany. This data includes the structural design of the plants, the fuels used, resource and energy consumption and the exhaust gas purification processes used. In addition, flue gas composition, emission profiles and operating modes of the plants are analysed. Information and data from plant operators, authorities and associations supplement this overview and provide a practical picture of the current situation.

Identification of optimisation potential

A further aspect of the project involves identifying opportunities for minimising emissions from the drying process and the processes themselves. This involves analysing how and whether the processes can be improved and drying processes can be converted to greenhouse gas-neutral methods. Particular attention is paid to replacing fossil fuels with environmentally friendly, renewable energy sources.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	10
Tabellenverzeichnis	10
Abkürzungsverzeichnis	12
Zusammenfassung	15
Summary	23
1 Trocknungsanlagen zur Aufbereitung von Restmüll für die Herstellung von Ersatzbrennstoffen	30
1.1 Vorwort zur Datenlage bei der Abfalltrocknung	30
1.2 Rechtliche und normative Grundlagen der Abfalltrocknung	30
1.3 Grundsätzliche Einordnung des Anwendungsgebietes Abfalltrocknung und der dort angewandten Trocknung	31
1.4 Beschreibung des Einsatzstoffes (Siedlungsabfall)	32
1.5 Grundlegender Verfahrensablauf der MPS-Anlagen und der Trocknung	34
1.6 Die Trockner der MPS-Anlagen im Detail.....	38
1.7 Abgasleitung und Abgasnachbehandlung der MPS-Anlagen	39
1.8 Behördlich überwachte trocknungsbeeinflusste Emissionen der Abfalltrocknung ..	40
1.9 Hemmnisse kontinuierlicher Messungen der Emissionen hinter MPS-Anlagen	43
1.10 Potentiale der Emissionsminderung der MPS-Anlagen	43
1.11 Weiteres Optimierungspotential der MPS-Anlagen — Optionen zur Umstellung der Trocknungsverfahren auf treibhausgasneutrale Verfahren	43
2 Direkte Trocknung bei der Herstellung von Asphalt.....	45
2.1 Vorwort zur Datenlage bei der Asphaltherstellung	45
2.2 Rechtliche und normative Grundlagen der Asphaltherstellung.....	45
2.3 Grundsätzliche Einordnung des Anwendungsgebietes Asphaltherstellung.....	46
2.4 Beschreibung der Einsatzstoffe der Asphaltherstellung	47
2.5 Grundlegender Verfahrensablauf der Asphaltherstellung.....	47
2.6 Die bei der Asphaltherstellung eingesetzten Trockneranlagen im Detail.....	49
2.6.1 Trockner zur Erhitzung der Gesteinskörnungen.....	49
2.6.2 Trockner zur Erhitzung von Ausbauasphalt.....	50
2.6.3 Statistische Analyse des Anlagenbestands der AMA in Deutschland.....	51
2.6.4 Brennstoffeinsatz bei der Asphaltherstellung.....	54
2.7 Abgasleitung und Abgasnachbehandlung bei der Asphaltherstellung	55
2.8 Behördlich überwachte trocknungsbeeinflusste Emissionen der AMA.....	56
2.8.1 Gesetzliche Forderungen an die Emissionsüberwachung der AMA.....	56

2.8.2	Abgasströme und Abgaslasten der bei der Asphaltherstellung eingesetzten Trocknungstechnik	57
2.9	Hemmnisse für kontinuierliche Emissionsüberwachung an Asphaltmischanlagen ..	59
2.10	Potentiale der Emissionsminderung an Asphaltmischanlagen	62
2.11	Weiteres Optimierungspotential der Anlagen — Optionen zur Umstellung der Trocknungsverfahren auf treibhausgasneutrale Verfahren.....	63
3	Direkte Trocknung von Grünfütter zur Herstellung von Trockengrün.....	65
3.1	Vorwort zur Datenlage bei der Herstellung von Trockengrün	65
3.2	Rechtliche und normative Grundlagen der Trockengrünherstellung	65
3.3	Grundsätzliche Einordnung des Anwendungsgebietes Trockengrünherstellung sowie der darin angewandten Trocknung	67
3.4	Beschreibung des Einsatzstoffes Grünfütter.....	67
3.5	Grundlegender Verfahrensablauf des Prozesses und der Trocknung von Grünfütter	68
3.6	Die Trockner der Grünfütter Trocknung im Detail	69
3.6.1	Trocknertypen und deren Leistungsdaten bei der Trockengrünherstellung.....	69
3.6.2	Brennstoffeinsatz und Feuerungsanlagen der Trockengrünherstellung.....	70
3.6.3	Beschreibung von Anlagen zur Trockengrünherstellung, die dem Stand der Technik entsprechen.....	71
3.7	Abgasvolumenströme, Abgasleitung und Abgasnachbehandlung der Trockengrüntrockner	73
3.7.1	Gesetzliche Forderungen an die Emissionsüberwachung der Trockengrünherstellung	74
3.7.2	Abgaskomponenten des Abgases hinter Trocknern der Trockengrünherstellung	75
3.8	Hindernisse beim Einsatz kontinuierlicher Messtechnik bei der Trockengrünherstellung.....	76
3.9	Potentiale der Emissionsminderung bei der Trockengrünherstellung.....	76
3.10	Weiteres Optimierungspotential der Trockenwerke zur Herstellung von Trockengrün	77
4	Direkte Trocknung von Zuckerrübenschnitzeln als Futtermittel	78
4.1	Vorwort zur Datenlage bei der Zuckerrübenschnitzeltrocknung.....	78
4.2	Rechtliche und normative Grundlagen der Zuckerrübenschnitzeltrocknung	78
4.3	Grundsätzliche Einordnung des Anwendungsgebietes Zuckerrübenschnitzeltrocknung sowie der darin angewandten Trocknung.....	79
4.4	Beschreibung des Einsatzstoffes Zuckerrübenschnitzel	80
4.5	Grundlegender Verfahrensablauf des Prozesses sowie der Trocknung von Zuckerrübenschnitzeln.....	80

4.6	Trocknung und Trockner der Zuckerrübenschnitzeltrocknung im Detail	84
4.6.1	Trocknungsarten der Zuckerrübenschnitzeltrocknung	84
4.6.2	Trocknertypen und ihre Anwendung bei der Zuckerrübenschnitzeltrocknung	85
4.6.3	Zur Erzeugung der Trocknungsenergie eingesetzte Brennstoffe	87
4.7	Abgasvolumenströme, Abgasleitung und Abgasnachbehandlung der Zuckerrübenschnitzeltrocknung	87
4.8	Von der Zuckerrübenschnitzeltrocknung beeinflusste, behördlich überwachte Emissionen	88
4.8.1	Gesetzliche Forderungen an die Emissionsüberwachung der Zuckerrübenschnitzeltrocknung.....	88
4.8.2	Abgasströme und Abgaslasten der Zuckerrübenschnitzeltrocknung.....	92
4.9	Hemmnisse für kontinuierliche Emissionsüberwachung bei der Trocknung von Zuckerrübenschnitzeln.....	94
4.10	Potentiale der Emissionsminderung bei der Zuckerrübenschnitzeltrocknung	94
4.11	Weiteres Optimierungspotential der Anlagen zur Zuckerrübenschnitzeltrocknung	95
5	Literaturverzeichnis	96
A	Anhang zum Abschnitt 1 (MPS-Anlagen)	103
B	Anhang zum Abschnitt 2 (Asphaltemischanlagen)	107
C	Anhang zum Abschnitt 4 (Zuckerrübenschnitzeltrocknung).....	109

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Wesentliche Verfahrensschritte bei der Herstellung von (Ersatz-) Brennstoffen (EBS) aus Abfällen	32
Abbildung 2:	Haumüllzusammensetzung in Deutschland im Jahr 2020	34
Abbildung 3:	Verfahrensschema der MPS-Anlagen.....	35
Abbildung 4:	Massebilanz (exemplarisch) einer MPS- Anlage aus dem Jahre 2011.....	36
Abbildung 5:	Grundlegende Komponenten der Abgasnachbehandlung der MPS-Anlagen	39
Abbildung 6:	Verfahrensschema der Asphaltherstellung ohne Beachtung von Asphaltrecycling	48
Abbildung 7:	Exemplarische Darstellung einer stationären AMA.....	49
Abbildung 8:	Prinzipielle Arbeitsschritte bei der Herstellung von Trockengrün	68
Abbildung 9:	Verteilung der Brennstoffe zur Erzeugung von Heißgas für die Trocknung von Trockengrün	71
Abbildung 10:	Verfahrensablauf bei der Heißlufttrocknung von Trockengrün	72
Abbildung 11:	Vereinfachte Darstellung der Verfahrensschritte der Trockenschnitzelherstellung	81
Abbildung 12:	Erzeugte Futtermittel aus Zuckerrüben bezogen auf 100 % Jahresproduktion	82
Abbildung 13:	Verfahrensfließbild der MPS-Anlage 1 zur EBS-Herstellung...	103
Abbildung 14:	Verfahrensfließbild der MPS-Anlage 2 und 3 zur EBS-Herstellung	104
Abbildung 15:	Vereinfachtes Fließbild der relevanten Gasströme der MPS-Anlagen 2 und 3	105
Abbildung 16:	Schematische Darstellung der Zuckerherstellung	109

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Rechtliche und normative Grundlagen für die Abfallbehandlung mit mechanisch-physikalischer Stabilisierung	30
Tabelle 2:	Spezifizierung der Zusammensetzung des Einsatzstoffes von Restabfallbehandlungsanlagen zur EBS-Herstellung.....	33
Tabelle 3:	Kapazitäten und Durchsätze der betrachteten MPS-Abfallbehandlungsanlagen	37
Tabelle 4:	Zusammenfassung wesentlicher Anlagenkenndaten der EBS-Trockner	39
Tabelle 5:	Emissionsbegrenzungen der MPS-Anlagen nach ABA-VwV	40
Tabelle 6:	Emissionsgrenzwerte der MPS-Anlagen (Stand Oktober 2024)	41

Tabelle 7:	Zusammenstellung der überwachten Emissionen der MPS-Anlagen.	42
Tabelle 8:	Rechtliche und normative Grundlagen der Asphaltherstellung.	46
Tabelle 9:	Kennwerte einer repräsentativen Auswahl von Asphaltmischanlagen	51
Tabelle 10:	Hochrechnung zu anlagenspezifischen Daten deutscher Asphaltmischanlagen plus Konfidenzintervall mit einem Konfidenzniveau von 95 %	53
Tabelle 11:	Produktionsstätten für Asphalt in Europa	54
Tabelle 12:	Grenzwerte nach TA Luft 2021 für Asphaltmischanlagen	56
Tabelle 13:	Emissionsdaten von Asphaltmischanlagen, gekürzte Darstellung, entnommen aus der VDI 2283.	58
Tabelle 14:	Betriebskosten bei Einsatz kontinuierlicher Emissionsmesstechnik für Gesamtkohlenstoff laut Betreiber .62	
Tabelle 15:	Rechtliche und normative Grundlagen für die Grünfütteretrocknung	66
Tabelle 16:	Betreiber von Trocknungsanlagen, welche dem Stand der Technik entsprechen	72
Tabelle 17:	Technische Parameter eines Trocknungswerkes, welches nach Verbandsangaben dem Stand der Technik entspricht	73
Tabelle 18:	Emissionsbegrenzungen nach TA Luft 2021 und NaGeMi-VwV für Anlagen zur Trocknung von Grünfütter	74
Tabelle 19:	Staubemissionen dreier französischer Standorte zur Herstellung von Trockengrün	75
Tabelle 20:	Rechtliche und normative Grundlagen für die Zuckerrübenschnitzeltrocknung	78
Tabelle 21:	Erläuterungen zu den in Abbildung 12 verwendeten Begrifflichkeiten.	82
Tabelle 22:	Emissionsgrenzwerte (GW) im Abgas von Verdampfungstrocknern für Zuckerrübenschnitzel	91
Tabelle 23:	Emissionsgrenzwerte im Abgas von Hochtemperatur-Verdunstungstrocknern für Zuckerrübenschnitzel.....	91
Tabelle 24:	Emissionsgrenzwerte im Abgas von Niedertemperatur-Verdunstungstrocknern für Zuckerrübenschnitzel.....	92
Tabelle 25:	Zusammenfassung wesentlicher Anlagenkenndaten der MPS-Trockner	106
Tabelle 26:	Emissionsdaten von Asphaltmischanlagen nach Tabelle 4 VDI 2283.	107

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
AISV	Anlagenbezogener Immissionsschutz / Störfallvorsorge (Ausschuss der LAI)
AMA	Asphaltemischanlage
BaP	Benzo(a)pyren
BATC	Best Available Technology Conclusion (BVT-Schlussfolgerungen)
BImSchG	Bundes-Immissionsschutzgesetz
BImSchV	Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes
BHKW	Blockheizkraftwerk
BKS	Braunkohlestaub
BLTD	Bundesfachverband Landwirtschaftlicher Trocknungswerke Deutschland e.V.
BREF	Best Available Technique Reference Documents (BVT-Merkblätter)
BVT	Beste verfügbare Techniken
CCR	Carbon capture und removal – allgemein Techniken zur CO ₂ - Abscheidung
DAV	Deutscher Asphaltverband e.V.
DTA	Direkttrocknungsanlage
EAPA	European Asphalt Pavement Association
EBS	Ersatzbrennstoff
FE-Metalle	Eisenhaltige (magnetisierbare) Metalle
FID	Flammenionisationsdetektor
FI-Schutzschalter	Fehlerstrom-Schutzschalter
Fluff	Flugfähige Fraktionen der Sekundär-/ Ersatzbrennstoffe
FuttMV	Futtermittelverordnung
GEE	Europäische Geruchseinheit
Gesamt-C	Gesamtkohlenstoff, organische Stoffe im Abgas, ohne staubförmige organische Stoffe
Gesamtstaub	im Abgas enthaltene, einatembare staubförmige Emissionen
GewAbfV	Gewerbeabfallverordnung
Heizöl EL (HEL)	Heizöl extra leicht
HGE	Heißgaserzeuger
HTT	Hochtemperaturtrocknung
IED	Industrial Emissions Directive / Richtlinie 2010/75/EU

Abkürzung	Bedeutung
KrWG	Kreislaufwirtschaftsgesetz
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
LAI	Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Immissionsschutz
LFGB	Lebensmittel- und Futtermittelgesetzbuch
NaGeMi-VwV	Allgemeine Verwaltungsvorschrift zur Reduzierung von Emissionen und Umweltauswirkungen in der Nahrungsmittel-, Getränke- und Milchindustrie
MBA	Mechanisch-Biologische Abfallbehandlung
MBS	Mechanisch-Biologische Stabilisierung
MPS	Mechanisch-Physikalische Stabilisierung
NE-Metalle	Nicht-eisenhaltige Metalle
NMVOC	Non-methane volatile organic compounds (flüchtige organische Verbindungen ohne Methan)
NO_x	Stickstoffmonoxid und Stickstoffdioxid
NTT	Niedertemperaturtrocknung
PAK	Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe
PCB	Polychlorierte Biphenyle
PM_{2,5} und PM₁₀	Feinstaub der Partikelgrößen <2,5 µm bzw. <10 µm
QS	Prüfzeichen der QS Qualität und Sicherheit GmbH
QTN	Qualitätstrocknung Nordbayern e.G.
RaBa	Restabfallbehandlungsanlage
RC	Recyclingasphalt
RTO	Regenerative thermische Oxidation
SNCR	Selektive nichtkatalytische Reduktion
SO_x	Gesamtheit der Schwefeloxide
TA Luft	Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft
TEQ	Toxizitätsäquivalent im Zusammenhang mit Polychlorierten Dioxinen
TOC	Total organic carbon (gesamter organischer Kohlenstoff)
tr	trocken (Bezug auf Gas ohne Wasserdampfanteil)
TRBA	Technische Regeln für Biologische Arbeitsstoffe
TVOC	Total volatile organic compounds (Gesamtheit flüchtiger organischer Verbindungen)
UBA	Umweltbundesamt

Abkürzung	Bedeutung
UDP	Undegradable Dietary Protein (Pansenbeständiges Protein)
UTWS	Trocknungsverfahren nach dem Prinzip der Umluft zur Holzspänetrocknung
VdZ	Verein der Zuckerindustrie e.V.
VGMS	Verband der Getreide-, Mühlen- und Stärkewirtschaft VGMS e.V.
VOC	Volatile organic compounds (flüchtige organische Verbindungen)
VwV	Verwaltungsvorschrift

Zusammenfassung

Das Forschungsvorhaben „Stand der Technik von Direkttrocknungsanlagen“ untersucht die aktuellen Entwicklungen und Technologien in diesem Bereich. Eine zentrale Aufgabe ist die Erarbeitung der rechtlichen und normativen Grundlagen durch die Recherche deutscher und europäischer Regelungen für Trocknungsanlagen. Ergebnis ist, dass Direkttrocknungsanlagen sich in einer Vielzahl von Anwendungsbereichen finden.

Der direkte Nachweis des Einsatzes von Direkttrocknungsanlagen gelang für die Abfallaufbereitung, die Altglasaufbereitung, die Asphaltherstellung, die Bentonit-Trocknung (Ton), die Dämmstoffherstellung (Blähglas), die Düngemittelherstellung (Calciumcarbonat, FerroDuo-Eisen-(II)-Sulfat, Phosphat, Kalkstickstoff), die Eisenhydroxidschlamm-trocknung, die Gipstrocknung bzw. Herstellung von Gipsplatten, die Herstellung von Feuerfestmaterial, die Futtermittelproduktion (Trockengrün), die Herstellung von Holzwerkstoffen, die Kaolinaufbereitung, die Herstellung von Semmelbröseln, die Produktion von Steinzeugen, die Verarbeitung von Textilien, die Trocknung von Trockensand und die Ziegel-trocknung.

Neben der Vielzahl von Anwendungsgebieten kristallisierte sich heraus, dass meist keine normierten Prozessketten existieren, die Betreiber also über die Art und Weise der nötigen Trocknung entscheiden. Zudem handelt es sich vor allem bei den Grund- und Baustoffen sowie Textilien meist um kleinere Anlagen mit verminderter Feuerungsleistung. Um das Forschungsprojekt zielgerichtet durchzuführen, erfolgte in Rücksprache mit dem Auftraggeber eine Eingrenzung der Anwendungsgebiete auf:

- ▶ Abfallnachbehandlung
- ▶ Asphaltherstellung
- ▶ Holzwerkstoffherstellung (Spanplatten, OSB-Platten, Faserplatten)
- ▶ Trockengrünherstellung
- ▶ Zuckerrübenschnitzeltrocknung

Aufgrund von Problemen bei der Implementierung der BVT-Schlussfolgerungen, der verfügbaren Datenbasis und wirtschaftlichen Signifikanz der Branche, wird der Berichtsteil für die Holzwerkstoffindustrie separat veröffentlicht.

Die Erfassung des Stands der Technik der Trocknungsanlagen und der Abgasnachbehandlung erfolgte durch Literaturrecherche, Datenanalyse und Experteninterviews. Ein Vergleich zu indirekt arbeitenden Trocknungsverfahren war, wenn möglich, vorzunehmen. Ziel war die Sammlung, Aufarbeitung und der Vergleich der Daten der in Deutschland betriebenen Anlagen. Diese Daten umfassen die bauliche Ausführung der Anlagen, verwendete Brennstoffe, Ressourcen- und Energieverbräuche sowie eingesetzte Abgasreinigungsverfahren. Zusätzlich zu recherchieren und analysieren waren die Abgaszusammensetzung, die Emissionsprofile und Betriebsweisen der Anlagen. Informationen und Daten von Anlagenbetreibern, Behörden und Verbänden dienten der Ergänzung und dem Abgleich.

Ein weiterer Aspekt des Projektes betraf die Identifizierung von Möglichkeiten zur Emissionsminderung bei den Trocknungsprozessen und den Prozessen selbst. Dabei galt es zu untersuchen, wie und ob sich Prozesse verbessern und Trocknungsverfahren auf treibhausgasneutrale Methoden umstellen lassen. Besonderes Augenmerk lag auf dem Ersatz fossiler Brennstoffe durch umweltfreundliche, regenerative Energiequellen.

Der folgende Bericht gliedert sich in die Bereiche Abfallnachbehandlung (1), Asphaltherstellung (2), Trockengrünherstellung (3) und Zuckerrübenschnitzeltrocknung (4). Neben der Bewertung der Datenlage wird eine Zusammenfassung der rechtlichen und normativen Rahmenbedingungen für jeden Anwendungsbereich gegeben. Anschließend erfolgt die grundsätzliche Einordnung des Trocknungsbereiches, die Charakterisierung der Einsatzstoffe und die Beschreibung des grundsätzlichen Verfahrensablaufes, bevor jedes Kapitel auf die jeweiligen Trockner im Detail eingeht.

Dem schließt sich eine Beschreibung der Abgasführung und -reinigung sowie der Emissionen der Trocknungsprozesse an. Darauf folgen, sofern vorhanden, die Hemmnisse für den Einsatz kontinuierlicher Messtechnik. Abschließend geht jedes Kapitel auf die Optimierungspotenziale der Trocknung, der Abgasreinigung sowie der Prozesse ein.

Abfallaufbereitung – Trocknung mit dem MPS-Verfahren

Der Einsatzstoff der Abfalltrocknung besteht generell aus gemischten Siedlungsabfällen, welche sich aus verschiedensten Abfallkomponenten wie Altpapier, Altglas, Metallen, Kunststoffen, Verbunden, Alttextilien, Holz/Kork, nativ-organischen Abfällen, Problem- und Schadstoffen zusammensetzen. Einer mechanischen Vorbehandlung durch diverse Verfahrensschritte wie das Vorzerkleinern, Sieben, Abtrennen von Wert und- Störstoffen mittels unterschiedlicher Verfahren etc. schließt sich eine thermische Trocknung an. Das getrocknete Produkt, der sogenannte Ersatzbrennstoff, welcher primär aus heizwertreichen Bestandteilen besteht, wird pelletiert oder als Fluff direkt an Abfallverbrennungsanlagen geliefert.

In Deutschland existieren drei Anlagen, welche Rest- oder Hausmüll entsprechend aufbereiten und so ca. 2,6 % dieses Abfalls aufarbeiten. Es kommen nahezu baugleiche Trommeltrockner zum Einsatz. Dem abrasiven Trockengut entsprechend weisen diese Aggregate allerdings selbsthärtende Auskleidungen auf. Extreme Bedingungen, stark schwankende Trockengutzusammensetzungen und -feuchten sowie das teilweise stark abrasive Gut erfordern eine regelmäßige Wartung, um beispielsweise Anbackungen zu entfernen und verschlissene Anlagenteile zu ersetzen.

Die maßgebliche Wärmezufuhr zur Trocknung erfolgt durch erdgasbefeuerte, extern installierte Brenner mit einer Gesamtfeuerungsleistung von 7,5 MW. Zur Verbesserung der Energieeffizienz und Minderung der organischen Emissionen findet eine Rückführung des feuchten Trocknerabgases (Brüden, zwischen 66 bis 80 Volumenprozent vom Gesamtstrom) statt.

Die kumulierte Durchlaufzeit von der Aufgabe des Abfalls bis zur Verladung des EBS beträgt ca. 60 Minuten, was im Vergleich mit anderen Abfallbehandlungstechniken gering ist und eine flexiblere Bearbeitung ermöglichen sollte.

Die Abluft der Trockner gelangt zur weiteren Abscheidung von festen und flüssigen Partikeln zunächst in einen oder mehrere Schwerkraftabscheider, vornehmlich Zyklone. Das Abgas wird prozessabhängig bei Bedarf entweder zur Minderung der staubförmigen Emissionen durch den Gewebefilter oder über einen Bypass in eine regenerative thermische Oxidation (RTO) geleitet. Deren Aufgabe besteht in der Minderung der organischen Last des Abgasstroms und der Geruchsstoffe. Bei zwei von drei Anlagen schließt sich an die RTO ein Aktivkohlefilter zur kontinuierlichen Minderung des Quecksilbergehalts (Hg) an. Das so gereinigte Abgas gelangt über einen Kamin ins Freie.

Die Emissionen der MPS-Anlagen variieren zwischen den einzelnen Standorten und sind augenscheinlich vom zu behandelnden Einsatzstoff abhängig. Wesentlich für MPS-Anlagen sind die Emissionen von Gesamtkohlenstoff sowie Gesamtstaub, deren Messung an allen drei Standorten kontinuierlich erfolgt. Die vorgegebenen Grenzwerte werden weitestgehend eingehalten, ohne

erkennbare Tendenz über die Jahre. Ammoniak (NH_3) liegt nahe dem Grenzwert und weist zudem eine starke Schwankungsbreite auf.

An den Anlagen erfolgt kontinuierlich die Überwachung der Abgasparameter Gesamtkohlenstoff, Gesamtstaub und Quecksilber. Dies ist möglich durch:

- ▶ Geringe Feuchte- und Staubgehalt des Trocknerabgases, wodurch Ablagerungen in der Abgasreinigung reduziert werden,
- ▶ Verwendung von Erdgas mit gutem Ausbrand, der keine Glutfetzen erzeugt,
- ▶ Moderne Abgasreinigung aufgrund der Inbetriebnahme nach 2005,
- ▶ 24-Stunden-Betrieb mit ausreichender Anzahl an Halbstundenmittelwerten.

Zur weiteren Optimierung und Emissionsminderung sind folgende Maßnahmen denkbar:

- ▶ Autotherme Fahrweise der RTO (höhere Umsetzungsrate der Schadstoffe, insbesondere NO_x),
- ▶ Lagerung von Abfällen zur NH_3 -Minderung (standortspezifisch umgesetzt),
- ▶ Kombination vorhandener und neuer Anlagenteile (BHKW zur Stromerzeugung und Verbrennungsluftvorwärmung),
- ▶ Optimierung des Innenaufbaus der Trocknertrommel (standortspezifisch umgesetzt),
- ▶ Einsatz von Aktivkohlefiltern (standortspezifisch umgesetzt).

Asphaltherstellung – Trocknung von Gesteinskörnungen und Ausbauasphalt

Zum Oktober 2020 existieren in Deutschland etwa 550 stationäre Asphaltmischanlagen (AMA). Ungeachtet dieser großen Anzahl an Standorten gestaltet sich die Datenlage zu diesen Anlagen schwierig, da keine zentrale Erfassung existiert oder kumulierte Daten verfügbar sind. Daher basiert die maßgebliche Datengrundlage auf der aktualisierten VDI-Richtlinie. AMA unterliegen keiner europäischen Rechtsnorm, weshalb die TA Luft als Hauptquelle für die Emissionsgrenzwerte gilt.

Asphaltmischanlagen produzieren Asphaltmischgut für den Straßenbau. Die Herstellung erfolgt meist chargenweise nach Kundenspezifikation. Aufgrund verschiedener Limitierungen ist der Transport auf etwa 100 km im Umkreis der AMA begrenzt, weshalb Asphalt stark von der regionalen Nachfrage abhängt, was die Fahrweise der Anlagen beeinflusst.

Je nach Kundenanforderungen an den Asphalt erfolgt die Zusammenstellung aus Gesteinskörnungen, Bitumen, Füller, Zusatzstoffen (Chemische Zusätze wie Wachse, Gummigranulate oder Zellulosefasern) sowie Asphaltgranulat, also wiederverwertetem, aufbereiteten (granulierten) Ausbauasphalt.

Der Verfahrensablauf in einer Asphaltmischanlage umfasst in jeden Fall die Schritte:

1. Lagern und Vordosieren der Gesteinskörnungen,
2. Trocknen und Erhitzen der Gesteinskörnungen,
3. Sieben und Dosieren der heißen Gesteinskörnungen und Zusatzstoffe,
4. Lagern und Dosieren des Bitumens,
5. Mischen von Gesteinskörnungen, Bitumen und Zusatzstoffen,
6. Verladen oder Zwischenlagern des Mischguts (Asphalt).

Die meisten Anlagen sind technisch in der Lage, Recyclingmaterial (Ausbauasphalt) aus dem Straßenbau in kalter oder warmer Form als Zuschlagstoff zu verarbeiten. Bei der warmen Zugabe erfolgt auch eine Trocknung des granulierten Ausbauasphalts (RC-Material). Die Zugaborte variieren – meist sind pro Standort mehrere Möglichkeiten vorhanden, die je nach Rezeptur eingesetzt werden.

Zur Trocknung kommen Drehrohröfen (Trommeltrockner) zum Einsatz. Diese sind in der Regel schräg gestellt, und das Trockengut durchläuft von der höheren Aufgabeseite zur tieferen Entnahmeseite ein Gefälle. Spezielle Einbauten und die Drehbewegung der Trockentrommel fördern das Trockengut. Neigung, Rotationsgeschwindigkeit der Trommel sowie Art und Anzahl der Einbauten beeinflussen die Verweildauer des Trockenguts.

Unterschiede bestehen zwischen der Trocknung von Gesteinskörnungen und Ausbauasphalt sowie in der Strömungsführung bei der Trocknung von Ausbauasphalt. Die Erhitzung der Gesteinskörnungen erfolgt immer im Gegenstromverfahren, während granulierter Ausbauasphalt im Gleich- oder Gegenstromverfahren erwärmt und getrocknet wird. Eine weitere Möglichkeit ist die Erwärmung und Trocknung des granulierten Asphalts durch die Mischung mit dem sich erwärmenden Asphalt (Mittenzugabe).

Diese Verfahren führen zu konstruktiven Unterschieden der Trommeltrockner hinsichtlich Länge und Durchmesser, vor allem auch zu einer variierenden Beschaufelung (Einbauten). Zudem beeinflussen die Einsatzstoffe und die gewählte Strömungsführung die Trocknungsbedingungen. Dies führt zu Unterschieden in der Temperaturführung der Trommeltrockner, beeinflusst zudem das Temperaturprofil, die Trommelaustrittstemperatur des Trockenguts und Abgase sowie den maximalen Anteil an möglichem RC-Material.

In den Asphaltmischanlagen kommen als Brennstoffe Braunkohlenstaub (BKS), Heizöl EL, Erdgas und Flüssiggas zum Einsatz. Die Energieverbräuche zeigen eine starke Abhängigkeit von der Ausgangsfeuchte der Gesteinskörnungen oder des Ausbauasphalts. Die Abgase der Trocknung werden abgesaugt und fließen durch Vorabscheider und filternde Abscheider, wobei das abgeschiedene Material größtenteils wieder dem Prozess zufließt. Gleichstrom- und Gegenstromtrockner für granulierten Ausbauasphalt nutzen die Rückführung von Brüden zur Senkung des Energieverbrauchs der Anlage.

Die Datenlage zu den Abgasströmen und Emissionen der AMA ist ungenügend, weshalb im Bericht hauptsächlich die VDI 2203 zitiert wird. Die darin enthaltenen Emissionsdaten zeigen, dass die Mehrheit der Anlagen Ausbauasphalt recyceln kann. Braunkohlestaub ist der hauptsächlich eingesetzte Brennstoff. Die Emissionsdaten lassen keine signifikanten Grenzwertüberschreitungen erkennen. Ersichtlich ist jedoch, dass Trocknungsanlagen, die mit Braunkohlestaub betrieben werden, deutlich höhere Emissionswerte bei typischen Feuerungsabgasen (Kohlenmonoxid, Stickoxide, Schwefeldioxid) aufweisen. Insbesondere Erdgas befeuerte Anlagen emittieren diese Feuerungsabgase in deutlich geringerem Maße.

Die kontinuierliche Überwachung der Emissionen, insbesondere des Gesamtkohlenstoffs, ist ein aktuelles Streitthema zwischen Behörden und Betreibern. Gemäß Einschätzung der Behörden ist kontinuierlich betriebene Messtechnik zur Erfassung von Gesamtkohlenstoffs verfügbar und kann störungsfrei betrieben werden. Aus Sicht der Behörden sind die Kosten für Anschaffung und Betrieb vertretbar, so dass der Umweltnutzen überwiegt. Die Einwände gegen das speziell angepasste Parametrierungskonzept für AMA sind aus Sicht der Behörden nicht nachvollziehbar.

Auch die Betreiberseite bestätigt die Möglichkeit des Einsatzes kontinuierlicher Messtechnik an AMA. Kritisiert wird das aus Sicht der Betreiber unzureichend abgestimmte Parametrierungs-

konzept, das als anfällig für Ausreißer gilt und der Maximierung der Wiederverwendungsrate von Ausbauasphalt entgegensteht. Die Kosten für die Umrüstung und den Betrieb stehen gemäß Betreibern in keinem Verhältnis zum Umsatz. Grundsätzlicher Kritikpunkt ist die stark nachfrageorientierte, diskontinuierliche Fahrweise der AMA.

Wesentliche Potenziale der Optimierung der Anlagen und Emissionsminderung werden in folgenden Maßnahmen gesehen:

- ▶ Maximierung der Wiederverwertung von Asphalt,
- ▶ Feuchtigkeitsgeschützte Lagerung von Gesteinskörnungen und Ausbauasphalt,
- ▶ Einsatz von Niedertemperaturasphalt.

Aktuelle Forschungsbestrebungen dokumentieren zudem den Versuch, Bitumen durch biologische Bindemittel zu ersetzen. Bei Verfügbarkeit ausreichender Mengen an regenerativ erzeugtem Strom (und passenden wirtschaftlichen Randdaten) scheint auch eine Elektrifizierung des Trocknungsprozesses möglich – zumindest existiert eine Beispielanlage in Norwegen.

Trockengrünherstellung – Trocknung von Grünfutter

Trockengrün ist getrocknetes Grünfutter, das hauptsächlich aus Gras, Luzerne oder Klee besteht. Konserviert durch Trocknungsprozesse kommt es während der Wintermonate oder in Zeiten geringer Pflanzenproduktion als Futtermittel für Nutztiere zum Einsatz. Herstellung, Vermarktung, Lagerung, Beförderung und Verwendung von Futtermitteln wie Trockengrün ist in der EU detailliert geregelt. Das einschlägige BVT-Merkblatt der Nahrungsmittel-, Getränke- und Milchindustrie behandelt Trocknungsanlagen zur Grünfuttertrocknung, ohne explizit auf deutsche Standorte einzugehen. In den zugehörigen BVT-Schlussfolgerungen erfolgt die Behandlung im Kapitel „2. BVT-Schlussfolgerungen für Futtermittel“, wobei nur grundlegende Anforderungen formuliert werden. Ausführlichere Regelungen und strengere Anforderungen finden sich in den Verwaltungsvorschriften, der TA Luft 2021 und der NaGeMi-VwV, jeweils unter Nr. 5.4.7.25, wobei letztgenannte VwV die Regelungen für die Anlagen nochmals konkretisiert.

In Deutschland existieren laut Branchenfachverband insgesamt 37 Trocknungsstandorte, vorwiegend organisiert als Genossenschaften. Die Trocknungsanlagen erhalten das Grünfutter von Landwirten aus einem Umkreis von etwa 80 Kilometern und verarbeiten dieses. Das Futter wird in der Region produziert und genutzt, wodurch die Wertschöpfung lokal bleibt.

Die Trocknungswerke zerkleinern das Grünfutter zunächst mechanisch mittels Häcksler. Das Zerkleinern vergrößert die Oberfläche des Materials, was die Trocknung verkürzt. Dem folgt die eigentliche Heißlufttrocknung in Trommeltrocknern mit direkter Befeuerung. Bei Temperaturen über 300 °C wird dem zerkleinerten Grünfutter Wasser entzogen, bis der gewünschte Restfeuchtigkeitsgehalt erreicht ist. Der Trocknung schließt sich die Kühlung des Materials an, um die Qualität zu erhalten und Schimmelbildung zu verhindern. Das abgekühlte Trockengrün wird anschließend zu Pellets (Cobs) oder Ballen gepresst.

Die Trocknung von Grünfutter findet ausschließlich mittels Trommeltrockner bei direkter Beheizung durch einen eingebauten Brenner statt. Über die Bauweise der Trockner von Grünfutter ist lediglich bekannt, dass die zur Abfallaufbereitung eingesetzten Trocknern darauf basieren. Es lässt sich daher vermuten, dass die eingesetzten Trockner ähnlich aufgebaut sind. Die Eintrittstemperaturen des Heißgases in die Trockner liegen typischerweise zwischen 500 und 600 °C. Am Ausgang der Trockner beträgt die Temperatur des Abgases zwischen 80 und 140 °C. Aufgrund dieser Abgastemperaturen und der Notwendigkeit, die Effizienz der Trocknung zu bei

gleichzeitigem Erhalt der Qualität des Futters zu maximieren, lässt sich ferner schlussfolgern, dass sich das Trockengut während des Trocknungsprozesses auf etwa 60 bis 70 °C erwärmt.

Die Befeuerung der Anlagen erfolgte 2021 nach Angaben des Fachverbandes zum Großteil mit Erdgasbrennern. Bei knapp einem Viertel der Anlagen kommen naturbelassene Holzhackschnitzel in Kesseln zum Einsatz. Für drei Anlagen ist der Einsatz von Kohlestaub ausgewiesen. Die thermischen Leistungen der Feuerungsanlagen bewegen sich zwischen 5 bis 20 Megawatt. Alle Standorte führen einen Teil des Trocknerabgases (Brüdenrückführung) zum Heißgaserzeuger zurück, um damit die Verbrennungsluft vorzuwärmen. Vereinzelt kommen Bandtrockner zur Vortrocknung des Grünguts zum Einsatz.

Informationen zu den Abgasvolumenströmen und der Abgasmatrix sind begrenzt, basieren im westlichen auf Angaben des Fachverbandes. Demnach besteht die Abgasnachbehandlung aus der (teilweisen) Kombination von Abgasrückführung (Brüdenrückführung) und Wäschern, Schlauchfiltern sowie (Multi-)Zyklonen. Den Autoren der Studie ist allerdings keine Anlage mit einem Wäscher bekannt. Wegen der Brandgefahr durch glühende Aschebestandteile sind Schlauchfilter nur bei entsprechend aschefreiem Brennstoff zu erwarten.

Die Abgasmatrix besteht im Wesentlichen aus Wasserdampf, Kohlendioxid, Stickoxiden, Kohlenmonoxid, Staub sowie organischen Komponenten. Im Laufe des Forschungsprojektes konnten keine dedizierten Massekonzentrationen deutscher Anlagen recherchiert werden. Dies liegt vermutlich daran, dass es bis zur Novellierung der TA Luft keine derartigen gesetzlichen Forderungen an die Anlagenbetreiber gab.

Das ungünstige Kosten-Nutzen-Verhältnis begrenzt die Nachrüstung der Anlagen mit kontinuierlichen Messeinrichtungen. Potentiale zur Emissionsminderung bestehen durch Anwelken (Vortrocknen auf Feld und/oder Hof der Trocknungswerke), Vortrocknung mittels Bandtrocknern sowie dem Einsatz von Zyklonen oder Nasswäschern zur Reduktion staubförmiger Emissionen. Das BVT-Merkblatt gibt an, dass Zyklone eine Reduzierung der Emissionen um bis zu 70 % bewirken können.

Eine technische Neuerung stellt ein elektrisch beheizter Gegenstromtrockner dar. Diese in Norwegen installierte Anlage nutzt Hochtemperatur-Wärmepumpen, um das erforderliche Temperaturniveau zu erreichen. Für einen ökonomischen Betrieb sind niedrige Strompreise, idealerweise aus erneuerbaren Quellen, erforderlich.

Zuckerrübenschnitzeltrocknung – Trocknung fester Rückstände der Zuckerherstellung

Es gibt in Deutschland 18 aktive Zuckerfabriken. Wegen fehlender frei verfügbarer Daten zu den Standorten wurde daher der Fachverband kontaktiert. Aufgrund von wettbewerbsrechtlichen Beschränkungen bleiben jedoch einige wichtige Informationen des Fachverbandes, wie die Aufschlüsselung der in deutschen Zuckerfabriken eingesetzten Direkttrocknungsanlagen nach Niedertemperatur- und Hochtemperaturtrocknung, unzugänglich. Die dem Bericht zugrunde liegenden Informationen und Daten setzen sich daher maßgeblich aus Informationen von Behörden, vom Fachverband und aus Informationen der zugehörigen VDI-Richtlinie zusammen. Zudem stützt sich die Studie auf das „Beste verfügbare Techniken (BVT) Referenzdokument für die Lebensmittel-, Getränke- und Milchindustrie und das zugehörige BVT-Merkblatt.

Die rechtlichen Grundlagen der Zuckerrübenschnitzeltrocknung ähneln denen der Trockengrünerzeugung. So legen die BVT-Schlussfolgerungen für die Nahrungsmittel-, Getränke- und Milchindustrie (BVT Nahrungsmittel-, Getränke- und Milchindustrie, 2019) bauliche und betriebliche Anforderungen an die Energieeffizienz und Abfallvermeidung sowie im Falle der Zuckerrübenschnitzeltrocknung, spezifische Emissionsgrenzwerte, fest. Darüber hinaus definieren die BVT-Schlussfolgerungen Messhäufigkeiten zur Überwachung der Emissionen. Die Überführung des

Großteils dieser Anforderungen in nationales Recht erfolgte durch die Novellierung der TA Luft 2021. Seit 2023 gilt die Allgemeine Verwaltungsvorschrift NaGeMi - VwV, die die TA Luft 2021 ergänzt bzw. die BVT-Schlussfolgerungen vollständig in nationales Recht überführt. Zudem enthält die NaGeMi-VwV eine bundeseinheitliche Konkretisierung des Standes der Technik in Bezug auf Nachverbrennungseinrichtungen der betroffenen Anlagen und die erzielbaren Emissionsminderungen bei Acetaldehyd.

Zuckerrübenschnitzel selbst sind ein Nebenprodukt der Zuckerrübenverarbeitung, deren Rübenkörper zu 75–78 % aus Wasser besteht. Nach verschiedenen Vorbearbeitungsschritten und der Extraktion des Rohsafts liegen die Rübenschnitzel vor. Die unterschiedliche Beschaffenheit des Rübenmaterials sowie der Vorbehandlung in der Extraktion und den Schnitzelpressen führt zu einem inhomogenen Trockengut. Dies hat Auswirkungen auf den Trocknungsprozess.

Die Trocknung der Zuckerrübenschnitzel erfolgt im ersten Schritt rein mechanisch mittels Spindelpressen, anschließend bei Bedarf thermisch. Hinsichtlich der Trocknungsart ist bei der thermischen Trocknung prinzipiell zwischen Verdunstungs- und Verdampfungstrocknung zu unterscheiden. Die Verdunstungstrocknung differenziert man ferner in die Niedertemperaturtrocknung sowie die Hochtemperaturtrocknung. Während die Niedertemperaturtrocknung am jeweiligen Standort verfügbare Abwärmepotentiale geringer Temperatur zur Vortrocknung nutzt, trocknet die Hochtemperaturtrocknung auf Endfeuchte. Nur letztere stellt damit eine Direkttrocknung im Sinne der Aufgabenstellung dar.

Die direkte Hochtemperaturtrocknung (HTT) ist weltweit das am häufigsten eingesetzte Verfahren zur Zuckerrübenschnitzeltrocknung. Hierbei kommen Trommeltrockner zum Einsatz, wobei die bereits melassierten Pressschnitzel und das Trocknungsgas im Gleichstrom geführt werden. Der Aufbau kann als Einzugstrommeln oder Dreizugtrommeln erfolgen. Stand der Technik ist die Rückführung der Trocknungsgase und die Nutzung der Restwärme. Das Trocknungsgas besteht aus einer Mischung aus Feuerungsgas, Rauchgas der Dampferzeugung (einzige Verbindung zur Zuckerfabrik), Brüden sowie „Falsch“- und Kühlluft. Konstruktive Angaben zu den Trocknern sind nicht bekannt.

Der Branchenverband VdZ berichtet in einer Stellungnahme, dass zur Energieversorgung der Standorte ein Brennstoffmix aus Gas, Schweröl, Braunkohle und Steinkohle genutzt wird. Der Anteil gasförmiger Brennstoffe, einschließlich Biogas, soll dabei über 60 % betragen. Angaben zur eingesetzten Feuerungsleistung liegen nicht vor.

Auch die vorliegenden Angaben zu den Abgasströmen, der Zusammensetzung des Abgases und der eingesetzten Abgasreinigungstechniken sind spärlich. Das BVT-Merkblatt listet Zyklone und Nasswäscher als mögliche Abgasnachbehandlungsmaßnahmen, jedoch ohne deutsche Referenzstandorte für Zyklone. Der Branchenfachverband berichtet, dass Stickoxide teilweise zur Reinigung des Carbonatationsbrüden genutzt werden, wodurch das Abgas indirekt gereinigt wird. Ein Artikel von Freudenberg über das Zuckerwerk Wabern berichtet über die Reduktion des Ammoniakgehalts im Carbonatationsbrüden bei Zugabe in die Brennkammer des Trommeltrockners. Diese Maßnahme unterschritt den Grenzwert von 30 mg/m^3 deutlich bei gleichbleibender Emission an Stickoxiden. Die Autoren schließen daraus, dass eine tatsächliche Eliminierung des Ammoniaks durch eine selektive nicht-katalytische Reaktion (SNCR-Verfahren) erfolgte und keine Verdünnung durch den größeren Volumenstrom stattfand.

Die Beurteilung der Trocknungsemissionen beruht im Wesentlichen auf Angaben der zugehörigen VDI-Richtlinie 2594. Diese gibt für bestehende HTT-Verdunstungstrockner ermittelte Gesamtstaubgehalte zwischen $55 \text{ mg/m}^3(\text{f})$ und $75 \text{ mg/m}^3(\text{f})$ an. Die VDI 2594 gibt keine konkreten Messwerte für Hochtemperaturtrommeltrocknung an, weist aber auf verschiedene Einflussfaktoren wie die Zusammensetzung des Trockenguts, Trocknungsbedingungen und Trockensub-

stanzgehalte hin. Weder VDI-Richtlinie noch BVT-Merkblatt enthalten Daten, welche quantitativ und qualitativ ausreichend sind, um die auferlegten Emissionsgrenzwerte für die Anlagen beurteilen zu können.

Bezüglich der Hemmnisse für kontinuierliche Emissionsüberwachung bei der Trocknung von Zuckerrübenschnitzeln ist festzuhalten, dass ein vom Umweltbundesamt begleiteter Versuch bekannt ist, die kontinuierliche Messung von Gesamtkohlenstoff im Abgas von Hochtemperaturtrocknern zur Zuckerrübenschnitzeltrocknung umzusetzen. Die kontinuierliche Messung zeigte dabei Verharzungen des Messgasstrangs auf, erreichte zudem trotz erheblichem Wartungsaufwand nicht die geforderte Verfügbarkeit.

Maßnahmen zur Senkung der Trocknungstemperatur bewirken tendenziell niedrigere Emissionen an organischen Stoffen und stellen, wie die anzustrebende hohe mechanische Abpressung der Rübenschnitzel, eine wirksame Emissionsminderungsmaßnahme dar. Die im BVT-Merkblatt beschriebene Solartrocknung von Rübenschnitzeln gilt laut dem Fachverband als ungeeignet für Deutschland. Der Fachverband betont jedoch, dass in deutschen Produktionsstätten genügend ausgelaugte Zuckerrübenschnitzel vorhanden sind, um deren gesamten Energiebedarf durch energetische Verwertung der Rübenschnitzel zu decken. Eine Studie im Auftrag des VdZ untersuchte Technologien zur treibhausgasneutralen Zuckerindustrie, darunter Verdampfungstrocknung und Biogasanlagen. Das Biomassescenario bietet die höchsten Emissionseinsparungen, aber auch die höchsten Investitionskosten. Alle untersuchten Technologien sind verfügbar. Die Umsetzbarkeit hängt von äußeren Rahmenbedingungen und ethischen Überlegungen ab, wie der möglichen Verknappung von Futtermitteln.

Hinweis: Die Quellen, auf die sich die persönlichen Mitteilungen maßgeblich stützen, wurden in Abstimmung mit allen beteiligten Parteien anonymisiert, um Rückschlüsse auf einzelne Unternehmen zu vermeiden. Die Zuordnung der Quellen liegt dem Umweltbundesamt (UBA) in Form von Klarnamen vor und wurde dort entsprechend geprüft.

Summary

The research project "State of the Art of Direct Drying Systems" examines current developments and technologies in this field. A key task is to develop the legal and normative foundations by researching German and European regulations for drying systems. The results show that direct drying systems are found in a wide range of application areas.

Direct evidence of the use of direct drying systems was established for waste treatment, cullet processing, asphalt production, bentonite drying (clay), insulation material manufacturing (expanded glass), fertiliser production (calcium carbonate, FerroDuo iron(II) sulfate, phosphate, calcium cyanamide), iron hydroxide sludge drying, gypsum drying or gypsum board production, refractory material manufacturing, animal feed production (dried green), wood-based panel manufacturing, kaolin processing, breadcrumb production, stoneware manufacturing, textile processing, drying of dry sand, and brick drying.

Besides the wide range of application areas, it became clear that standardized process chains mostly do not exist, so operators decide on the necessary drying methods. Additionally, especially in the case of base and building materials as well as textiles, these are mostly smaller facilities with reduced firing capacity. To conduct the research project in a targeted manner, the application areas were narrowed down in consultation with the client to:

- ▶ Waste treatment
- ▶ Asphalt production
- ▶ Wood-based panel manufacturing (particleboard, OSB boards, fiberboard)
- ▶ Dried green production
- ▶ Sugar beet pulp drying

Due to some issues with the implementation of BAT conclusions, available database and economic significance of the wood-based materials industry, it will be analyzed in detail in a separate report.

The status of technology for drying systems and exhaust gas treatment was assessed through literature research, data analysis, and expert interviews. A comparison with indirectly operating drying methods was to be made where possible. The aim was to collect, process, and compare the data of plants operated in Germany. This data includes the structural design of the plants, used fuels, resource and energy consumption, as well as applied exhaust gas cleaning methods. Additionally, the exhaust gas composition, emission profiles, and operating modes of the plants were to be researched and analyzed. Information and data from plant operators, authorities, and associations were used to supplement and cross-check.

Another aspect of the project involved identifying opportunities for emission reduction in drying processes and the processes themselves. This included investigating how and whether processes could be improved, and drying methods switched to greenhouse gas-neutral methods. Particular attention was given to replacing fossil fuels with environmentally friendly, renewable energy sources.

The following report is divided into the areas of waste treatment (1), asphalt production (2), dried green production (3), and sugar beet pulp drying (4). Besides evaluating the data situation, a summary of the legal and normative frameworks for each application area is provided. Then, the fundamental classification of the drying area, the characterization of the input materials, and

the description of the basic process flow are given before each chapter goes into detail about the respective dryers.

This is followed by discussions on exhaust gas management and cleaning, exhaust gas flows, and emissions from the drying processes. Where applicable, the barriers to using continuous measurement technology are addressed. Each chapter concludes with the potential for optimizing drying, exhaust gas cleaning, and processes.

Waste treatment – Drying with the MPS process

The input material for waste drying generally consists of mixed municipal solid waste, which includes a variety of waste components such as old paper, old glass, metals, plastics, composites, old textiles, wood/cork, native organic waste, problematic, and hazardous materials. Following mechanical pre-treatment through various process steps such as pre-shredding, screening, and separation of valuable and disruptive materials using different methods, thermal drying takes place. The dried product, known as refuse-derived fuel, primarily consisting of high-calorific components, is pelletized, or delivered directly as fluff to waste incineration plants.

In Germany, three plants process residual solid waste, accordingly, treating about a 2,6 % of the country's residual or household waste. Almost identical drum dryers are used. These units have self-hardening linings corresponding to the abrasive nature of the drying material. Extreme conditions, highly variable material compositions and moisture levels, and partially very abrasive material require regular maintenance to remove caking and replace worn parts.

The significant heat supply for drying is provided by natural gas-fired, externally installed burners with a total firing capacity of 7.5 MW. To improve energy efficiency and reduce organic emissions, a portion of the moist dryer exhaust gas (vapours, between 66 to 80 volume percent of the total flow) is recirculated.

The total throughput time from waste input to the loading of the refuse-derived fuel is about 60 minutes, which is short compared to other waste treatment techniques and should allow more flexible processing.

The dryer exhaust gas initially passes through one or more gravity separators, mainly cyclones, to further separate solid and liquid particles. Depending on the process requirements, the exhaust gas is either directed through a fabric filter to reduce dust emissions or through a bypass to regenerative thermal oxidation (RTO). The RTO's purpose is to reduce the organic load and odors in the exhaust stream. At two of the three plants, the RTO is followed by an activated carbon filter to continuously reduce mercury (Hg) levels. The cleaned exhaust gas is released into the atmosphere via a chimney.

The emissions from MPS plants vary between sites and appear to depend on the input material. Significant for MPS plants are emissions of total carbon and total dust, which are continuously measured at all three sites. The prescribed limits are largely adhered to without noticeable trends over the years. Ammonia (NH₃) levels are close to the limit and show considerable fluctuations.

Continuous monitoring of exhaust parameters total carbon, total dust, and mercury is enabled by:

- Low moisture and dust content of the dryer exhaust gas, reducing deposits in the exhaust cleaning system,
- Use of natural gas with good combustion, producing no embers,
- Modern exhaust cleaning systems due to installations post-2005,

- ▶ 24-hour operation with a sufficient number of half-hour average values.

Further optimization and emission reduction options are:

- ▶ Autothermal operation of the RTO (higher conversion rates of pollutants, especially NO_x),
- ▶ Waste storage to reduce NH₃ (implemented at specific sites),
- ▶ Combining existing and new plant parts (CHP for power generation and preheating combustion air),
- ▶ Optimizing the internal design of the dryer drum (implemented at specific sites),
- ▶ Using activated carbon filters (implemented at specific sites).

Asphalt production – Drying of aggregates and reclaimed asphalt

As of October 2020, there are about 550 stationary asphalt mixing plants (AMA) in Germany. Despite this large number of locations, data on these plants is difficult to obtain due to a lack of central records or aggregated data. Therefore, the main data basis relies on the updated VDI guideline. AMAs are not subject to European legal standards, so the TA Luft serves as the primary source for emission limits.

Asphalt mixing plants produce asphalt mixtures. Production is usually done in batches. Due to various limitations, transport is restricted to about 100 km around the AMA, making asphalt highly dependent on regional demand, influencing plant operations.

Depending on customer requirements, the asphalt mix is composed of aggregates, bitumen, filler, additives (chemical additives such as waxes, rubber granules, or cellulose fibers), and reclaimed asphalt, i.e., recycled, processed (granulated) reclaimed asphalt.

The process flow in an asphalt mixing plant includes:

1. Storing and pre-dosing aggregates,
2. Drying and heating aggregates,
3. Screening and dosing hot aggregates and additives,
4. Storing and dosing bitumen,
5. Mixing aggregates, bitumen, and additives,
6. Loading or intermediate storage of the asphalt mixture.

Most plants can process recycled material (reclaimed asphalt, RC material) from road construction in either cold or warm form as an aggregate. When added warm, the granulated reclaimed asphalt (RC material) is also dried. The points of addition vary – most locations have multiple options that are used depending on the recipe.

Rotary kilns (drum dryers) are used for drying. These are usually inclined, and the drying material travels down a slope from the higher input side to the lower output side. Special fittings and the rotation of the dryer drum facilitate the movement of the material. The inclination, drum rotation speed, and type and number of fittings affect the material's residence time.

Differences exist between drying mineral aggregates and reclaimed asphalt as well as in the flow direction for drying reclaimed asphalt. Mineral aggregates are always heated in a counterflow process, while granulated reclaimed asphalt is heated and dried in either co-current or counterflow processes. Another option is heating and drying the granulated asphalt by mixing it with the heating asphalt (middle addition).

These methods result in structural differences in drum dryers regarding length and diameter and varying configurations of the internal fittings. Additionally, the input materials and chosen flow direction affect drying conditions. This leads to differences in temperature control of the drum dryers, influences the temperature profile, the exit temperature of the dried material, and exhaust gases, as well as the maximum possible RC material content.

In asphalt mixing plants, fuels used include brown coal dust (BKS), extra-light heating oil (EL), natural gas, and liquefied gas. Energy consumption strongly depends on the initial moisture content of the aggregates or reclaimed asphalt. The drying exhaust gases are extracted and pass through pre-separators and filtering separators, with most of the separated material returning to the process. Co-current and counterflow dryers for granulated reclaimed asphalt use vapours recirculation to reduce the plant's energy consumption.

Data on exhaust gas flows and emissions from AMAs is insufficient, so the report mainly cites VDI 2203. The emission data therein shows that most plants can recycle reclaimed asphalt. Brown coal dust is the primary fuel used. Emission data shows no significant exceedances of limit values. However, it is evident that drying systems using brown coal dust exhibit significantly higher emission levels of typical combustion gases (carbon monoxide, nitrogen oxides, sulfur dioxide). Natural gas-fired plants emit these gases to a much lesser extent.

Continuous emission monitoring, especially for total carbon, is a current contentious issue between authorities and operators. Authorities believe continuous measurement technology for total carbon is available and can be operated without disruption. From the authorities' perspective, the costs are justifiable, with the environmental benefits outweighing them. The objections to the specifically parameterization concept for AMAs are not comprehensible from the authorities' viewpoint.

The operator side also confirms the possibility of using continuous measurement technology at AMAs. Criticism is directed at the inadequately parameterization concept, which is prone to outliers and opposes the maximization of the recycling rate of reclaimed asphalt. Operators argue that the costs for retrofitting and operation are disproportionate to revenue. The main criticism is the strongly demand-oriented, discontinuous operation of AMAs.

Significant potential for plant optimization and emission reduction includes:

- ▶ Maximizing asphalt recycling,
- ▶ Moisture-protected storage of aggregates and reclaimed asphalt,
- ▶ Use of low-temperature asphalt.

Current research efforts document attempts to replace bitumen with biological binders. If sufficient quantities of renewable electricity are available (and given suitable economic conditions), electrification of the drying process seems possible – at least there is a pilot plant in Norway.

Dried green – Drying of green fodder

Dried green is dried green fodder, primarily consisting of grass, alfalfa, or clover. Conserved through drying processes, it is used as livestock feed during winter or periods of low plant production. Production, marketing, storage, transport, and use of feedstuffs such as dried green are detailed in EU regulations. The relevant BAT (Best Available Techniques) reference document for the food, beverage, and dairy industry addresses drying systems for forage drying, without specifically referring to German sites. The associated BAT conclusions are found in Chapter 2, "BAT Conclusions for Animal Feed," where only basic requirements are outlined.

More detailed regulations and stricter requirements are set out in the administrative guidelines, the TA Luft 2021, and the NaGeMi-VwV, each under section 5.4.7.25, with the latter document further specifying the regulations for these sites.

According to the industry association, there are 37 drying locations in Germany, mostly organized as cooperatives. The drying plants receive green fodder from farmers within about 80 kilometers and process it. The fodder is produced and used locally, keeping the added value within the region.

The drying plants first mechanically chop the green fodder using choppers. Chopping increases the material's surface area, shortening the drying time. This is followed by hot air drying in drum dryers with direct firing. At temperatures above 300 °C, water is extracted from the chopped green fodder until the desired residual moisture content is reached. The drying is followed by cooling the material to preserve quality and prevent mold growth. The cooled dried green is then pressed into pellets (cobs) or bales.

Green fodder drying is exclusively carried out using drum dryers with direct firing by an integrated burner. The design is known to be based on dryers used in waste processing. It can therefore be assumed that the dryers used are multi-stage. They should also have comparable sizes. The hot gas entry temperatures into the dryers typically range between 500 and 600 °C. At the dryer outlet, the exhaust gas temperature is between 80 and 140 °C. Due to these exhaust gas temperatures and the need to maximize drying efficiency while maintaining fodder quality, it can be concluded that the dried material heats up to about 60 to 70 °C during the drying process.

According to the industry association, the majority of plants used natural gas burners for firing in 2021. Nearly a quarter of the plants use untreated wood chips in boilers. Three plants use coal dust. The thermal outputs of the firing systems range between 5 and 20 megawatts. All sites recirculate part of the dryer exhaust gas (vapours recirculation) to the hot gas generator to preheat the combustion air. Occasionally, belt dryers are used for pre-drying the green material.

Information on exhaust gas volumes and exhaust gas matrix is limited, primarily based on the industry association's data. The exhaust gas treatment typically consists of a combination of exhaust gas recirculation (vapours recirculation) and scrubbers, bag filters, and (multi-)cyclones. However, no plant is known to the study authors to have a scrubber. Due to the fire hazard from glowing ash particles, bag filters are only expected with ash-free fuel.

The exhaust gas matrix mainly consists of water vapor, carbon dioxide, nitrogen oxides, carbon monoxide, dust, and organic components. No specific mass concentrations for German plants were researched during the project. This is likely due to the lack of such legal requirements for operators until the TA Luft amendment.

The unfavorable cost-benefit ratio limits the retrofitting of plants with continuous measurement equipment. Emission reduction potentials include wilting (pre-drying in the field and/or drying plants), pre-drying with belt dryers, and using cyclones or wet scrubbers to reduce dust emissions. The BVT reference document states that cyclones can reduce emissions by up to 70%.

A technical innovation is an electrically heated counterflow dryer. This plant in Norway uses high-temperature heat pumps to achieve the necessary temperature level. Economic operation requires low electricity prices, ideally from renewable sources.

Sugar beet pulp drying – Drying of solid residues from sugar production

There are 18 active sugar factories in Germany. Due to a lack of freely available data on the locations, the industry association (VdZ) was contacted. However, due to competitive restrictions, some critical information from the association, such as the breakdown of direct

drying systems in German sugar factories into low-temperature and high-temperature drying, is inaccessible. The report's underlying information and data mainly come from authorities, the industry association, and the related VDI guideline. Additionally, the study relies on the "Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Food, Drink, and Milk Industries" and the associated BAT reference document.

The legal basis for sugar beet pulp drying is similar to that of dried greenery production. For example, the BAT conclusions for the food, beverage and dairy industries (Implementing Decision (EU) 2019/2031) define structural and operational requirements for energy efficiency and waste prevention and, in the case of sugar beet pulp drying, specific emission limit values. In addition, the BAT conclusions define measurement intervals for monitoring emissions. The majority of these requirements were transposed into national law through the revision of TA Luft 2021. The General Administrative Regulation NaGeMi - VwV, which supplements TA Luft 2021 and fully transposes the BAT conclusions into national law, has been in force since 2023. In addition, the NaGeMi-VwV contains a nationwide specification of the state of the art with regard to post-combustion system of the affected plants and the achievable emission reductions for acetaldehyde.

Sugar beet pulp itself is a by-product of sugar beet processing, with beet bodies consisting of 75–78% water. After various pre-processing steps and raw juice extraction, the beet pulp is left. The different composition of the beet material and the pre-treatment in the extraction and pulp presses leads to heterogeneous drying material. This affects the drying process.

Sugar beet pulp drying is initially purely mechanical using spindle presses, followed by thermal drying if necessary. Regarding the drying method, thermal drying can be categorized into evaporative and evaporative drying. Evaporative drying is further differentiated into low-temperature and high-temperature drying. While low-temperature drying uses low-temperature waste heat available at the site for pre-drying, high-temperature drying dries to final moisture content. Only the latter constitutes direct drying within the task's scope.

Direct high-temperature drying (HTT) is the most commonly used method for sugar beet pulp drying worldwide. Drum dryers are used, where the molassed pulp and drying gas are conducted in co-current flow. The structure can consist of single-pass-drum or triple-pass-drum configurations. State-of-the-art technology includes recirculating the drying gases and using residual heat. The drying gas consists of a mixture of combustion gas, steam generation flue gas (the only connection to the sugar factory), redirected vapours, and "false" and cooling air. No structural details on the dryers are known.

The VdZ industry association reports that a fuel mix of gas, heavy oil, lignite, and hard coal is used for energy supply at the sites. The proportion of gaseous fuels, including biogas, is said to be over 60%. No information on the applied firing capacity is available.

Information on exhaust gas flows, exhaust gas composition, and applied exhaust gas cleaning techniques is also limited. The BAT reference document lists cyclones and wet scrubbers as possible exhaust gas treatment measures, but no German reference sites for cyclones. The industry association reports that nitrogen oxides are partially used to clean the carbonation steam, indirectly cleaning the exhaust gas. An article by Freudenberg about the Wabern sugar factory discusses the reduction of ammonia content in the carbonation steam when added to the drum dryer's combustion chamber. This measure significantly undershot the limit value of 30 mg/m³ while maintaining constant nitrogen oxide emissions. The authors conclude that actual ammonia elimination occurred through a selective non-catalytic reduction (SNCR) process and not through dilution by the larger volume flow.

The assessment of drying emissions is primarily based on the VDI guideline 2594. This specifies total dust content between 55 mg/m³(f) and 75 mg/m³(f) for existing HTT evaporative dryers. The VDI 2594 provides no specific measurements for high-temperature drum drying but highlights various influencing factors such as the composition of the drying material, drying conditions, and dry matter content. Neither the VDI guideline nor the BAT reference document contains data that are quantitatively and qualitatively sufficient to assess the imposed emission limits for the plants.

Regarding the barriers to continuous emissions monitoring in sugar beet pulp drying, a trial accompanied by the Umweltbundesamt is known, aiming to implement continuous measurement of total carbon in the exhaust gas of high-temperature dryers for sugar beet pulp drying. The continuous measurement showed clogging of the gas path, and despite significant maintenance efforts, the required availability was not achieved.

Measures to lower the drying temperature generally result in lower emissions of organic substances and represent an effective emission reduction measure, as does the goal of high mechanical dewatering of the beet pulp. The BAT reference document describes solar drying of beet pulps, but according to the industry association VdZ it's unsuitable for Germany. However, the industry association emphasizes that sufficient exhausted beet pulp is available in German production facilities to cover the entire energy demand through the energetic use of beet pulp. A study commissioned by the VdZ investigated technologies for a greenhouse gas-neutral sugar industry, including evaporative drying and biogas plants. The biomass scenario offers the highest emission savings but also the highest investment costs. All investigated technologies are available. Implementation depends on external conditions and ethical considerations, such as the potential scarcity of animal feed.

Note: The sources on which the personal communications are primarily based have been anonymized in consultation with all parties involved in order to avoid drawing conclusions about individual companies. The Federal Environment Agency (UBA) has received the sources in the form of clear names and has checked them accordingly.

1 Trocknungsanlagen zur Aufbereitung von Restmüll für die Herstellung von Ersatzbrennstoffen

1.1 Vorwort zur Datenlage bei der Abfalltrocknung

Dieser Abschnitt behandelt Abfallbehandlungsanlagen, welche aus Restmüll mittels mechanisch-physikalischer Stabilisierung (MPS, mechanische Aufbereitung, physikalische Trocknung) Ersatzbrennstoffe (EBS) herstellen. Die im Folgenden dargestellten Grafiken und Angaben zum Verfahrensablauf sowie technischen Details basieren hauptsächlich auf Unterlagen, die direkt vom Betreiber zur Verfügung gestellt wurden. Zusätzlich wurden Bescheide der zuständigen Genehmigungs- und Überwachungsbehörden herangezogen. Literatur von Verbänden oder unabhängigen Quellen konnte nicht recherchiert werden, was möglicherweise auf die geringe Anzahl der Standorte zurückzuführen ist, die diese Technik der Abfallaufarbeitung nutzen.

Dafür spricht auch, dass alle drei Standorte in der Arbeitsgemeinschaft Stoffspezifische Abfallbehandlung e. V. (ASA) organisiert sind, welche primär die Interessen der Standorte zur Mechanisch-Biologischen Abfallbehandlung vertritt (Mitarbeiter:in 1 Fachverband A Abfallbehandlung, Persönliche Mitteilung, 20. Oktober 2020). Im BVT-Merkblatt (European Commission: Joint Research Centre et al., 2018) wird ein umfassender und spezifizierter Überblick über das Thema Abfallbehandlung allgemein im europäischen Kontext gegeben. Neben der detaillierten Schilderung der im Prozessablauf der Standorte vorkommenden Einzelschritte (bspw. Zerkleinern, Trennen), werden auch die besten verfügbaren Techniken (BVT) skizziert, welche mit Durchführungsbeschluss 2018/1147 und der gewährten Umsetzungsfrist in Kraft treten (BVT Abfallbehandlung, 2018). Die hier behandelten Anlagen werden nicht explizit erwähnt. Aufgrund der Anlagenspezifika lässt sich vermuten, dass zwei MPS-Standorte Daten im BVT-Prozess beigesteuert haben, weshalb das BVT-Merkblatt als relevante Quelle gilt.

Die drei MPS-Standorte werden in einem Bericht zur Weiterentwicklung der mechanisch-biologischen Abfallbehandlung (MBA) erwähnt (Ketelsen & Becker, 2023). Der Bericht behandelt u.a. Stoffströme, Energieeinsätze und Klimabilanz der MBA sowie deren Optimierungspotential, enthält jedoch keine detaillierten Informationen zum technischen Aufbau der MPS-Standorte oder den durch die Trocknung verursachten Emissionen. Trotz der zuvor genannten Quellen basieren die im folgenden Kapitel präsentierten Daten maßgeblich auf Angaben von Betreibern und Behörden.

1.2 Rechtliche und normative Grundlagen der Abfalltrocknung

Die Tabelle 1 gibt einen Überblick über die rechtlichen und normativen Grundlagen der Abfallbehandlung mit mechanisch-physikalischer Stabilisierung. Sie enthält wesentliche Informationen zu relevanten Normen und Richtlinien sowie spezifische Vorgaben für Abfallbehandlungsanlagen. Diese Zusammenstellung dient als Leitfaden zur Einhaltung gesetzlicher Bestimmungen und zur Unterstützung der Praxis:

Tabelle 1: Rechtliche und normative Grundlagen für die Abfallbehandlung mit mechanisch-physikalischer Stabilisierung

Norm / Richtlinie	Inhalt
BVT- Schlussfolgerungen Abfallbehandlung (BVT Abfallbehandlung, 2018)	Bspw. Allgemeine Anforderungen wie Einführung und Anwendung eines Umweltmanagementsystems sowie spezifische wie BVT 31

Norm / Richtlinie	Inhalt
Verordnung über genehmigungsbedürftige Anlagen (4. BImSchV, 2017)	Es besteht Genehmigungs- und Überwachungspflicht gemäß Nr. 8.10 des Anhangs 1.
Allgemeine Verwaltungsvorschrift Abfallbehandlungsanlagen (ABA-VwV, 2022)	Nationale Umsetzung der sich aus den BTV-Schlussfolgerungen ergebenden Anforderungen. ABA-VwV enthält zusätzliche, in TA Luft nicht geregelte Anagentypen. Unter 5.4.8.10 sind Anforderungen für Anlagen Nr. 8.10 des Anhangs 1 4. BImSchV geregelt. Gibt z.T. konkrete Grenzwerte für Emissionen vor.
TA Luft 2021 (TA Luft, 2021)	Für Aspekte, die in der ABA-VwV nicht geregelt sind.
VDI-Richtlinie 3475 Blatt 3 „Anlagen zur mechanisch-biologischen Behandlung von Siedlungsabfällen“. (Verein Deutscher Ingenieure [VDI], 2006, Dezember)	Die MPS-Anlagen sind Nr. 1.4 „Mechanische Aufbereitung ohne oder mit physikalischer Trocknung – MA und MPS“ zuzuordnen. Die rechtlich nicht bindende Richtlinie befindet sich derzeit in Überarbeitung, weist aber keine konkreten Emissionsgrenzwerte für MPS-Anlagen auf.
TRBA 214 "Anlagen zur Behandlung und Verwertung von Abfällen"(TRBA 214, 2018)	Legt grundlegende Maßnahmen zum Schutz der Beschäftigten vor Gefährdungen durch die Exposition gegenüber Biostoffen bei Tätigkeiten in der Abfallwirtschaft fest.

1.3 Grundsätzliche Einordnung des Anwendungsgebietes Abfalltrocknung und der dort angewandten Trocknung

Die MPS-Anlagen erzeugen EBS mit Hilfe mechanischer Behandlung aus Hausmüll und hausmüllähnlichen Gewerbeabfällen sowie anderen Gewerbeabfällen, im allgemeinen gemischtem Siedlungsabfall. Altöl, organische Lösemittel, Tiermehl und -fette, Kunststoffreste gehören nicht dazu.

Im Sinne eines schonenden Umgangs mit natürlichen Ressourcen zielt das Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) auf eine Reduktion von Abfällen, insbesondere zu deponierender Abfälle. Dem folgend ist in Deutschland die Deponierung unbehandelter Abfälle seit dem 01. Juni 2005 untersagt, maßgeblich mit dem Ziel der Entstehung des klimaschädlichen Deponiegases entgegenzuwirken (Nehlsen AG, 2021). Es existieren verschiedene Ansätze zur nachhaltigen Gestaltung der kommunalen Abfallbewirtschaftung und dafür geeigneter Technologien – ein grundlegender Überblick ist in (Bilitewski, 2021) wieder gegeben.

Gängige Praxis ist hier auch die energetische Verwertung heizwertreicher Fraktionen von Hausmüll sowie hausmüllähnlichen Abfällen aus Gewerbe und Industrie. Sofern nicht stofflich verwertbar, erfolgt eine Aufarbeitung zu EBS. Für die Aufarbeitung von Siedlungsabfällen kommen verschiedene, mehrheitlich für den jeweiligen Einsatzstoff angepasste Verfahren respektive Anlagentypen zur Zerkleinerung, Klassierung und Sortierung der Abfälle sowie zur Abtrennung von Schad- und Störstoffen zum Einsatz (Informationsportal zur Abfallbewertung [IPA], 2019).

Im Jahr 2022 betrug das gesamte Abfallaufkommen gemäß Daten des statistischen Bundesamtes (DeStatis) etwa 16,6 Millionen Tonnen (Statistisches Bundesamt [Destatis], 2024b). Ein signifikanter Anteil von rund 20,6 % (Destatis, 2024a) gelangte in mechanisch-biologische Abfallbehandlungsanlagen (MBA) zur Aufbereitung zu Ersatzbrennstoffen (EBS). Im Wesentlichen zählen hierzu folgende Verfahrenstechniken (VDI, 2015, Oktober):

- Mechanisch-Biologische Abfallbehandlung (MBA-Verfahren, aerob/anaerob),
- Mechanisch-Biologische Stabilisierung (MBS-Verfahren),

► Mechanisch-Physikalische Stabilisierung (MPS-Verfahren).

Ein oder wenige Standardverfahren zur Gewinnung der heizwertreichen Fraktion und Aufbereitung als EBS existieren nicht – allen Verfahren gleich ist jedoch der allgemeine Ablauf nach Abbildung 1.

Abbildung 1: Wesentliche Verfahrensschritte bei der Herstellung von (Ersatz-) Brennstoffen (EBS) aus Abfällen



Quelle: eigene Darstellung, DBI-Gruppe 2023 nach (IPA, 2019)

Nach erfolgter Dokumentation (1, Abbildung 1) abfallspezifischer Kenngrößen findet üblicherweise die Konditionierung (2, Abbildung 1) beginnend mit einer Abtrennung grober Störstoffe statt. Dem schließen sich Grobzerkleinerung und Siebklassierung an, wodurch ascheerhöhende Bestandteile (inerte bzw. mineralische Anteile) dem Stoffstrom entfrachtet werden. Nach stufenweiser Klassierung folgen eine Abtrennung von Eisen- und Nichteisenmetallen zur weiteren stofflichen Verwertung sowie eine Absonderung von Schwer- und Leichtgut (IPA, 2019; Wikipedia-Autoren, o.D.).

Verfahren mit mechanisch-biologischer Abfallbehandlung (MBA) führen den getrennten, organikreichen Stoffstrom danach zum Abbau einer aeroben Rotte, der anaeroben Vergärung oder kombinierten Behandlungsschritten zu. Nach deutlicher Reduktion des organischen Bestandteils ist es in Deutschland gängige Praxis, die so behandelte Feinfraktion zu deponieren (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz [BMUV], 2017).

MBS als auch MPS-Verfahren hingegen zielen auf eine Trocknung (Stabilisierung) der Abfälle, das heißt den Erhalt der biogenen Bestandteile im heizwertreichen Stabilat. Für ersteres fungiert die Selbsterhitzung durch Mikroorganismen als Wärmequelle dieses Schrittes, bei MPS-Verfahren wird thermisch zugefeuert (BMUV, 2017). Auf die Stabilisierung folgen weitere trocken-mechanische Aufbereitungsschritte mit dem Ziel, zuvor noch nicht erfasste, stofflich verwertbare Abfallbestandteile auszuschleusen. Die heizwertreiche Fraktion hingegen findet derart aufbereitet (Fluff) oder weiter pelletiert als EBS in entsprechenden Kraftwerken oder Feuerungen industrieller Prozesse (beispielweise Zementwerke) Anwendung (BMUV, 2017).

1.4 Beschreibung des Einsatzstoffes (Siedlungsabfall)

Alle bekannten drei MPS Anlagen (Mitarbeiter:in 1 Fachverband A Abfallbehandlung, Persönliche Mitteilung, 20. Oktober 2020) verarbeiten Hausmüll und hausmüllähnliche Gewerbeabfälle, wobei die hausmüllähnlichen Gewerbeabfälle laut Betreiber nicht in der Funktion einer Vorbehandlungsanlage nach Gewerbeabfallverordnung (GewAbfV) angenommen werden. Gemäß Dornbusch et al. betrug das jährliche Aufkommen 2017 solcher Abfälle 12,9 Millionen Tonnen, bei 10,7 Millionen Tonnen Hausmüll. Die Differenz ergibt die miterfasste Menge des Gewerbeabfalls. Dies entspricht 156,3 kg/(E*a) beziehungsweise 128,2 kg/(E*a) (Dornbusch et al., 2020).

Die Zusammensetzung des Materials gestaltet sich laut der Studie divers, setzt sich maßgeblich aus Altpapier, Altglas, Metallen, Kunststoffen, Verbunden, Alttextilien, Holz/Kork, Nativ-organischen Abfällen, Problem- und Schadstoffen, Hygieneprodukten, Inertmaterial, sonstigen Abfällen und der Komponente Feinmüll (0–10 mm) zusammen. Die prozentuale Aufteilung der Bestan-

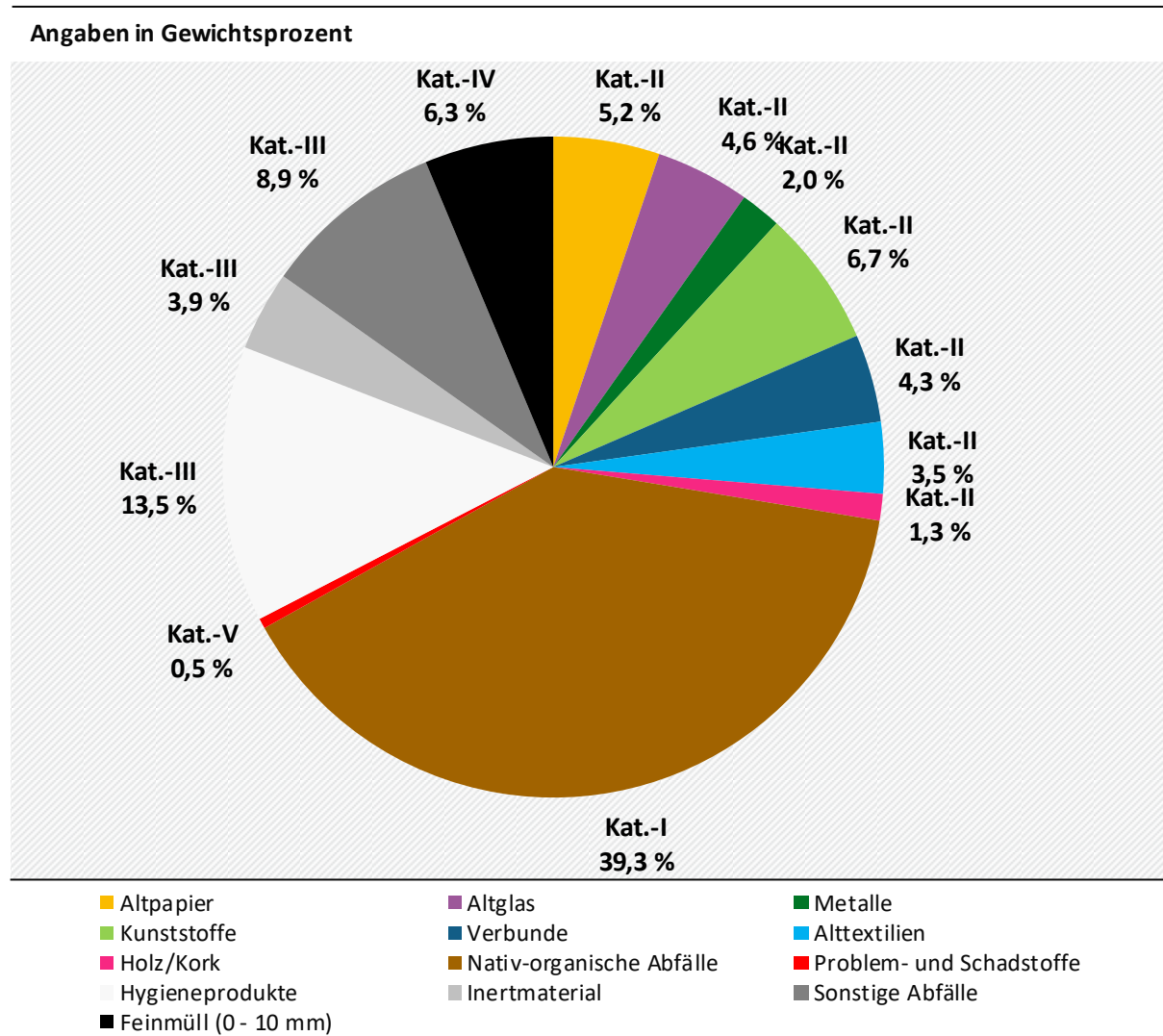
teile ist in Abbildung 2 auf Seite 35 gegeben. Zur besseren der Einordnung der in Abbildung 2 dargestellten Kategorien erläutert Tabelle 2 diese Kategorien nach Dornbusch (Dornbusch et al., 2020).

Tabelle 2: Spezifizierung der Zusammensetzung des Einsatzstoffes von Restabfallbehandlungsanlagen zur EBS-Herstellung

Kategorie	Bezeichnung	Gew.-%	Beispiele
I	Nativ-organische Abfälle	39,3	Küchen- und Nahrungsabfälle, sonstige organische Abfälle, Gartenabfälle, verpackte Lebensmittel
II	Trockene Wertstoffe	27,6	Altpapier, Altglas, Kunststoffe, Alttextilien, Holz/Kork, <i>Verbunde</i> , <i>Elektroaltgeräte</i>
III	Restabfall	26,3	Hygieneprodukte, Windeln, Inertmaterial, verschmutzte Tücher oder Staub und Asche
IV	Feinmüll	6,3	mineralische Bestandteile, sehr kleinteilige Wertstoffe sowie nativ-organische Abfälle (bspw. Kaffeesatz)
IV	Problem- und Schadstoffe	0,5	Arzneimittel, Altbatterien, Akkus, Lacke, quecksilberhaltige Leuchtmittel, belastete Bauabfälle

Gemäß Abbildung 1 erfolgen in besagten Anlagen vor dem Trockenschritt diverse Verfahrensschritte zur Zerkleinerung, Klassierung und Abtrennung von groben sowie feinen Störstoffen als auch Wertstoffen respektive Sekundärrohstoffen. Die eingesetzten Verfahren trennen grobe Elemente wie Farbeimer, Elektrogeräte oder Spielzeug, Sport- und Freizeitgeräte (Störstoffe) ab. Die Vorabscheidung der eisenhaltigen (magnetisierbar, FE-) und nichteisenhaltigen (NE-) Metalle beträgt gemäß Betreiber 3,1 Massenprozent respektive 1 Massenprozent (siehe Abbildung 4 Seite 37). Zudem findet eine Abtrennung von Inertmaterial (8,4 Massenprozent vom Input) und Leichtstoffen statt.

Abbildung 2: Hausmüllzusammensetzung in Deutschland im Jahr 2020



Quelle: eigene Darstellung, DBI-Gruppe 2021 nach (Dornbusch et al., 2020)

Der Stoffstrom, der den Trockner erreicht, ist hinsichtlich des Feuchtegehalts und seiner Zusammensetzung sehr unterschiedlich (Platzk, 2018) und schwankt im Tagesverlauf. Dies führt zu einer komplexen Abgasmatrix und einer Vielzahl von Grenzwerten, die unter den Immissionschutz fallen.

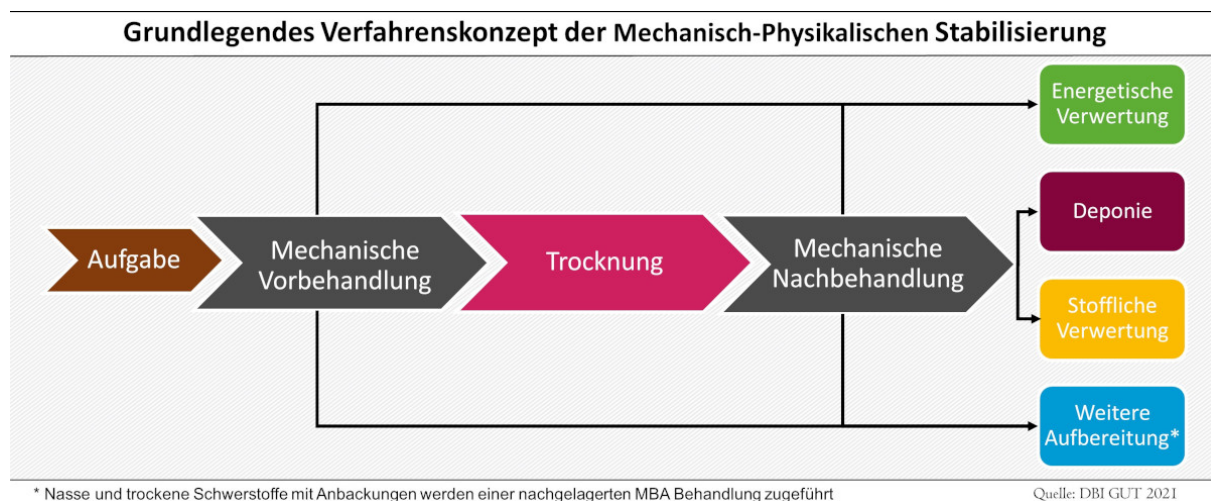
Es ist wichtig zu betonen, dass es erhebliche Unterschiede in der Zusammensetzung zwischen reinem Hausmüll und gewerblichen Siedlungsabfällen oder deren Mischungen gibt. Diese Unterschiede wirken sich auch auf die durch die Trocknung entstehenden Emissionen aus. Ein Indiz dafür sind die voneinander abweichenden Emissionsgrenzwerte der Anlagen. Hier gibt es Unterschiede bei den überwachten Schadstoffen und teilweise auch bei der Höhe der festgelegten Grenzwerte für einzelne Schadstoffe. Hierauf wird im weiteren Verlauf des Berichtes noch eingegangen.

1.5 Grundlegender Verfahrensablauf der MPS-Anlagen und der Trocknung

Es existieren europaweit drei nahezu baugleiche MPS-Anlagen, welche Siedlungsabfall aufarbeiten, in verschiedene Fraktionen trennen und einen heizwertreichen Ersatzbrennstoff erzeugen. Die Anlagen befinden sich in Sachsen und Berlin. Ursprünglich konzeptioniert wurden alle drei

Anlagen als Energie- und Einsatzstofflieferant für die Abfallvergasungsanlage zur Methanolherstellung der Sekundärrohstoff-Verwertungszentrum Schwarze Pumpe GmbH (SVZ) (Geschäftsführung Unternehmen 1. Abfallbehandlung, Persönliche Mitteilung, 4. März 2020; 1. Juni 2021). Genehmigt von 2003–2004 mit Anlagenkapazitäten von etwa 150000 t bis 190000 t pro Jahr fand nachfolgend die Errichtung als sogenannte Restabfallbehandlungsanlage (RaBa) statt. Die Technologie der Methanolherstellung hat nach verschiedenen Quellen allerdings wirtschaftlich niemals profitabel funktioniert, sodass der ursprünglich geplante Abnehmer des EBS als auch dessen Nachfolger heute nicht mehr existieren (hww Wienberg, 2005; Lausitzer Rundschau, 2007; Niederlausitz Aktuell, 2009).

Abbildung 3: Verfahrensschema der MPS-Anlagen



Quelle: eigene Darstellung, DBI-Gruppe 2021 nach (Platzk, 2018)

Den allgemeinen Ablauf der Abfallbehandlung stellt Abbildung 1 auf Seite 33 anschaulich dar. Abbildung 3 geht auf den Verfahrensablauf der MPS-Standorte ein, Abbildung 4 auf die Stoffströme. Detaillierter werden die Prozessschritte im Anhang A (Abbildung 13, Abbildung 14) dargestellt.

Grundsätzlich ist festzuhalten, dass alle wesentlichen Prozessschritte von der Annahmekontrolle und Wägung bis hin zur (optionalen) Pelletierung in eingehausten Produktionshallen oder Maschinen bei stetem Unterdruck stattfinden, um eine Emission von Schadstoffen an die Umwelt zu verhindern oder zumindest zu minimieren.

Bei der MPS werden heizwertreiche Abfallbestandteile aus den Siedlungsabfällen (Hausmüll) ausschließlich über mechanische und physikalische Verfahren sortiert und in einem mehrstufigen Behandlungsprozess zu EBS aufbereitet. In einem komplexen Verfahren erfolgen zunächst die Vorzerkleinerung respektive der Aufschluss der Abfälle. Anschließend klassieren Siebe den Stoffstrom in verschiedene Größenklassen, um dann aus diesen Fraktionen erstmals stofflich verwertbare Anteile (zum Beispiel Metalle) und vor allem Störstoffe auszusortieren. Hierbei kommen Magnetscheider (für FE-Material), Wirbelstromscheider (für NE-Material) und Windsichter (für Leichtgut) zu Einsatz. Dem schließt sich für Schwer- und Leichtgut ein Granulierschritt, wenn nötig zudem eine Nachzerkleinerung, an, bevor die eigentliche Trocknung des verbliebenen, wieder zusammen geführten Stoffstroms ansteht.

Die Unterschiede in der Vorbehandlung zwischen den Anlagen sind als gering zu bezeichnen, haben aber letztlich an allen Standorten Auswirkungen auf den Trockenschritt. Am wesentlichsten erscheint, dass ein Standort die Fraktion 60 – 240 mm zumindest anteilig am Trockner vorbei schleust und direkt in den EBS –Fluff mischt beziehungsweise pelletiert, während die verbliebe-

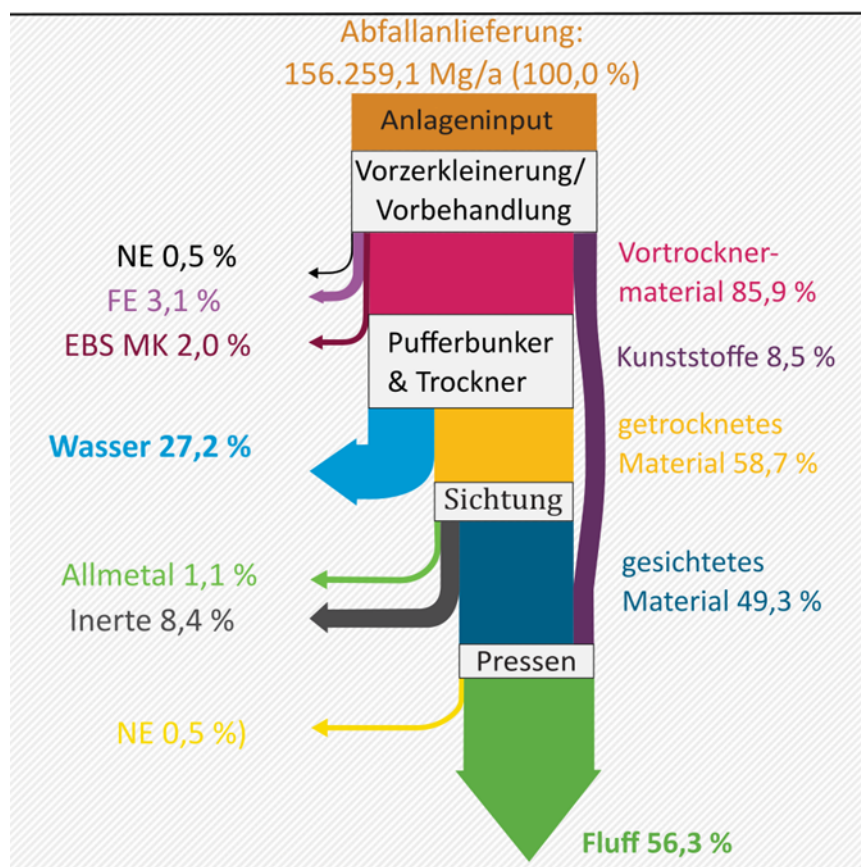
nen zwei Standorte das gesamte Material über den Trockner fahren. Dies geschieht zur Einstellung von Heizwert und Restfeuchte des EBS. Dort jedoch findet eine Beimischung des granulierten Leichtguts direkt in den EBS bei Umfahrung des Trockners statt.

Wesentliche Verfahrensschritte der MPS-Anlagen

- ▶ Vorzerkleinerung und Störstoffentnahme
- ▶ Klassierung der Abfälle in verschiedene Korngrößenfraktionen
- ▶ Abscheidung von Eisen und Nichteisenmetallen sowie Leichtstoffen
- ▶ Nachzerkleinerung
- ▶ Granulierung und Zusammenführung der Teilströme
- ▶ Trocknung der Fraktion < 60 mm auf eine Restfeuchte von ca. 15 %
- ▶ Sichtung des getrockneten Materials
- ▶ Ausschleusung und Deponierung der inerten feinkörnigen Schwerstoffe

Abbildung 4: Massebilanz (exemplarisch) einer MPS- Anlage aus dem Jahre 2011

Massenbilanz MPS-2 – 2011



Quelle: eigene Darstellung, DBI-Gruppe 2021

Die Trocknung erfolgt thermisch und ist ausgelegt auf das Erreichen einer Restfeuchte von ca. 15 Massenprozent für die Fraktion kleiner 60 mm. Das Trockengut durchläuft bei einer durchschnittlichen Verweilzeit von 15 – 20 min mehrere Kammern (Mitarbeiter:in 1 Unternehmen 2 Abfallbehandlung, Persönliche Mitteilung, 2. Juni 2021). Die kumulierte Durchlaufzeit von der Aufgabe des Abfalls bis zur Verladung des EBS wird mit ca. 60 min angegeben, was sich im Vergleich mit anderen Abfallbehandlungstechniken als gering herausstellt und eine flexiblere Bearbeitung ermöglichen sollte.

Die Abbildung 4 zeigt die Massenbilanz der MPS-2 Anlage für das Jahr 2011. Sie illustriert die Verteilung der Abfallstoffe, beginnend mit der Anlieferung von 156.259,1 Mg/a, über die verschiedenen Verarbeitungsstufen (Vorzerkleinerung, Pufferbunker, Trockner, Sichtung und Pressen) bis hin zu den Endprodukten Fluff (56,3 Massenprozent), und verschiedenen Materialfraktionen (z.B. Kunststoffe 8,5 Massenprozent, getrocknetes Material 58,7 Massenprozent).

Die maßgebliche Wärmezufuhr zur Trocknung stellen erdgasbefeuerte, extern installierte Brenner mit einer Gesamtfeuerungsleistung von 7,5 MW bereit. Zur Verbesserung der Energieeffizienz und Minderung der organischen Emissionen findet eine Rückführung des feuchten Trocknerabgases (Brüden, zwischen 66–80 Volumenprozent vom Gesamtstrom) statt. Das Trocknerabgas verlässt die Trommel nicht vollständig gesättigt und weist an einem Standort durchschnittlich 75 % relative Feuchte auf (Geschäftsführung Unternehmen 1. Abfallbehandlung, Persönliche Mitteilung, 4. März 2020; 1. Juni 2021). Die drei Standorte sind für die in Tabelle 3 dargestellten Durchsätze genehmigt:

Tabelle 3: Kapazitäten und Durchsätze der betrachteten MPS-Abfallbehandlungsanlagen

Standort	Genehmigte Anlagenkapazität in t pro Jahr	Durchsatz in t pro Jahr
MPS-1	150.000	100.000
MPS-2	220.000	165.000
MPS-3	220.000	160.000

Der summierte Durchsatz der drei MPS-Anlagen liegt bei 435.000 Tonnen, was etwa 12,8 % des Gesamtaufkommens des in MBA-Anlagen behandelten Abfalls entspricht. Bezogen auf das gesamte Abfallaufkommen in Deutschland (siehe Abschnitt 1.3 Seite 32) macht der Anteil der MPS-Anlagen jedoch etwa 2,6 % aus.

Die Trockner arbeiten im Parallelstrombetrieb bei schwankenden Durchsätzen sowie Feuchtegehalten und Zusammensetzungen des Stoffstroms in etwa 250 Tage im Jahr. Der Standort MPS-1 erreicht dies durch vier Tage durchgängigen Regelbetrieb pro Woche bei einem Tag Wartung pro Woche. Für MPS-2/3 gilt ähnliches — lediglich das Wartungsintervall weist einen größeren Zeitabstand (14 Tage) auf.

Der Trocknung schließen sich noch verschiedene Klassierungs- und Sortierungsschritte an, bevor bei Bedarf die Pelletierung erfolgt. Hier zeigen sich größere Unterschiede zwischen den Berliner Standorten und Chemnitz, wo die Nachbereitung im Vergleich (siehe Anhang A Abbildung 13 respektive Abbildung 14) weniger stark untergliedert ist. Allem Anschein nach liegt dies an der Gewinnung weiterer Wertstoffströme, auf die an einem Standort bisher verzichtet wird.

Im Regelfall verlässt der fertig aufbereitete EBS primär aus Kostengründen als sogenannter Fluff den Produktionsstandort. Eine Pelletierung geschieht daher dem Vernehmen nach nur in Ausnahmefällen.

Vorteile der Trocknung in MPS-Anlagen

- ▶ Vergleichsweise schnelle Reduzierung der Feuchte (ca. 1 h von Aufgabe bis Ausschleusung), damit höhere Flexibilität und Durchsatz
- ▶ Gezieltes Einstellen der Restfeuchte (ca. 10–15 Ma%) (Geschäftsführung Unternehmen 1. Abfallbehandlung, Persönliche Mitteilung, 4. März 2020; 1. Juni 2021)
- ▶ Reduzierung der Restfeuchte führt zu Massenreduzierung (Ca. 65 Ma%), damit auch geringeren Transportkosten hin zum Bestimmungsort
- ▶ Schadstoffentfrachtung des Abfalls durch Freisetzung von VOC, TOC und Schwermetallverbindungen, welche im nachgelagerten Abluftreinigungsprozess behandelt werden
- ▶ Heizwerterhöhung
- ▶ Zeitgewinn im Vergleich zu biologisch-basierten Verfahren (Geschäftsführung Unternehmen 1. Abfallbehandlung, Persönliche Mitteilung, 4. März 2020; 1. Juni 2021)

Nachteile der Trocknung in MPS-Anlagen

- ▶ Brennstoffeinsatz bedingt zusätzliche CO₂-Emissionen
- ▶ Zusätzliche, zu wartende Anlagentechnik
- ▶ Vglw. teure Aufbereitung
- ▶ Zum Zeitpunkt der Recherche schwieriger Absatzmarkt für EBS

1.6 Die Trockner der MPS-Anlagen im Detail

Tabelle 4 auf Seite 40 fasst die wesentlichen Eckdaten der zur EBS-Herstellung eingesetzten Trockner zusammen. Tabelle 29 des Anhangs A listet weitere technische Details. Die Trommel-trockner sind denen im Bereich Trockengrün eingesetzten Anlagen ähnlich und stammen zumindest an einem Standort von einem im Bereich Trockengrün etablierten Hersteller. Dem abrasiven Trockengut entsprechend, weisen diese Aggregate allerdings selbsthärtende Auskleidungen auf (Geschäftsführung Unternehmen 1. Abfallbehandlung, Persönliche Mitteilung, 4. März 2020; 1. Juni 2021). Extreme Bedingungen, starke schwankende Trockengutzusammensetzungen und –feuchten sowie das teilweise stark abrasive Gut erfordern eine regelmäßige Wartung, um bspw. Anbackungen zu entfernen und verschlissene Anlagenteile zu ersetzen.

Die zur Wärmeerzeugung eingesetzten Brenner befinden sich in einer separaten Brennkammer und erhitzen eine Mischung aus Frischluft und rückgeführtem Brüden. Es besteht also kein direkter Flammkontakt. Der Anteil des aus energetischen Gründen rückgeführten Brüdens wird über entsprechende Stellklappen den Erfordernissen des Prozesses angepasst und die Anlage gemeinhin energetisch optimiert. An einem Standort ist die Nutzung von BHKW-Abwärme zumindest geplant. 2015 lag der Durchsatz der Trocknung bei 100.000 Tonnen Abfall im Jahr, wofür 15 Millionen kWh Erdgas verbrannt wurden. Daraus ergibt sich ein Einsatz an thermischer Energie von 150 kWh pro Tonne Abfall (Geschäftsführung Unternehmen 1. Abfallbehandlung, Persönliche Mitteilung, 4. März 2020; 1. Juni 2021).

Neben der energetischen Optimierung sorgt die Rückführung des Trocknerabgases für eine Inertisierung der Trockneratmosphäre – Ziel sind aus Gründen des Explosionsschutzes und zur Verhinderung der Verkohlung des Trockenguts weniger als 11 Volumenprozent Restsauerstoff (O₂).

Um dies auch während des Anfahrens, also bei Überschreiten dieses O₂-Gehaltes zu gewährleisten, erfolgt zumindest in einer Anlage die Eindüsung von zusätzlichem Wasser und Stickstoff bei Inbetriebnahme der Anlage.

Da dem Trockner zur Abluftbehandlung ein Gewebefilter nachgeschaltet ist, stellt die Trockneraustrittstemperatur einen weiteren Regelparameter dar. Zieltemperatur sind hier minimal 105 °C, um einen entsprechenden Restfeuchtegehalt zu erreichen, da sonst im Abfall enthaltene Erde als Schlamm ausfällt (Geschäftsführung Unternehmen 1. Abfallbehandlung, Persönliche Mitteilung, 4. März 2020; 1. Juni 2021). Des Weiteren arbeiten die Trockner im Unterdruck, damit keine bei der Trocknung entstehenden Dämpfe in die Hallenatmosphäre gelangen.

Tabelle 4: Zusammenfassung wesentlicher Anlagenkenndaten der EBS-Trockner

Anlage	EBS-1	EBS-2	EBS-3
Typ	Trommeltrockner	Trommeltrockner	Trommeltrockner
Anzahl	2 (Standard: Einzelbetrieb)	1	1
Länge	17 m	35	35
Brenner	3x, extern, $\sum P_{th} = 7,4$ MW	1x, extern, $\sum P_{th} = 7,5$ MW	1, extern, $\sum P_{th} = 7,5$ MW
Brennstoff	Erdgas	Erdgas	Erdgas
Erdgasverbrauch	160 kWh/t	keine Angaben	220 kWh/t
Strömungsführung	Gleichstrom	Gleichstrom	Gleichstrom
Brüdenrückführung	< 80 %	< 67 %	< 67 %
Temperatur Ein-/Ausgang	360 / 105 °C	360 / 115 °C	360 / 115 °C
Verweilzeit	10–20 min	10–20 min	10–20 min
Gutsfeuchte Ausgang	35–18 %	35–15 %	35–15 %
Trocknungsleistung	5tH ₂ O / h	2,5–7tH ₂ O / h	2,5–7tH ₂ O / h

1.7 Abgasleitung und Abgasnachbehandlung der MPS-Anlagen

Während das getrocknete Material nach dem Trockner der weiteren mechanischen Aufarbeitung zuströmt, gelangt die Abluft der Trockner zur weiteren Abscheidung von festen und flüssigen Partikeln zunächst in einen oder mehrere Schwerkraftabscheider, vornehmlich Zyklone. Eine grundlegende Darstellung der Abgasnachbehandlung zeigt Abbildung 5, ein detailliertes Schema ist in Anhang A (Abbildung 15) zu finden. Die bei der Abgasnachbehandlung abgeschiedenen, festen Bestandteile fließen nach den mechanischen Aufbereitungsschritten dem getrockneten Material zu – der so gereinigten Abluft hingegen wird der rückzuführende Brüdenanteil ausgekoppelt und dem Brenner zugeführt.

Abbildung 5: Grundlegende Komponenten der Abgasnachbehandlung der MPS-Anlagen



Quelle: eigene Darstellung, DBI-Gruppe 2021

Der restliche Abluftvolumenstrom strömt prozessabhängig bei Bedarf entweder durch den Gewebefilter oder über einen Bypass (nicht an allen Standorten installiert, Bypass wird nur bei Klappenstörung, Brand im Trockner bzw. zur Inertisierung der Anlage eingesetzt) direkt in die regenerative thermische Oxidation (RTO). Im Gegensatz zu den zwei vorgeschalteten Abgasreinigungsschritten, welche primär auf die Minderung der Feststoffanteil (u.a. Staub) abzielen, dient die RTO der Minderung der Emission organischer Stoffe einschließlich Geruchsstoffe. Sofern es die Prozessbedingungen erfordern, schließt sich bei zwei von drei Anlagen der RTO ein Aktivkohlefilter zur kontinuierlichen Minderung der Quecksilber (Hg)- Emissionen des Abgasteilstromes an. Die Formulierung impliziert auch die Möglichkeit des Bypasses des Abgasteilstromes um den Aktivkohlefilter herum. Aber: „Im tatsächlichen Betrieb der MPS-Anlagen hat sich ergeben, dass die Umschaltung die Filterleistung beeinträchtigt und der Aktivkohlefilter als Senke für Quecksilber dauerhaft aufgeschaltet wird“ (Mitarbeiter:in 1 SenUVK, Persönliche Mitteilung, 8. April 2020; 9. Juni 2020). Anschließend findet je nach Standort ggf. die Mischung mit anderen Abluftteilströmen und Ableitung über den jeweiligen, 30–40 m Schornstein des Standorts statt.

1.8 Behördlich überwachte trocknungsbeeinflusste Emissionen der Abfall-trocknung

In Deutschland und europaweit gibt es derzeit drei Anlagen, die nach dem Prinzip der "mechanisch-physikalischen Stabilisierung" Abfall thermisch trocknen und zu EBS aufbereiten. Der rechtliche Rahmen dieser MPS-Anlagen wurde bereits in Abschnitt 1.2 beschrieben. Detaillierte Regelungen für die Anlagen sind in der TA Luft 2021 und der allgemeinen Abfallverwaltungsvorschrift enthalten (ABA-VwV, 2022; TA Luft, 2021). Es gelten neben den in deren Abschnitt 5.2 genannten allgemeinen Anforderungen zur Emissionsbegrenzung der TA Luft auch spezifische Regelungen für die Anlagen, die unter 5.4.8.10a der ABA-VwV aufgeführt sind (TA Luft, 2021). Tabelle 5 fasst die aktuellen Anforderungen nach ABA-VwV kurz zusammen:

Tabelle 5: Emissionsbegrenzungen der MPS-Anlagen nach ABA-VwV

Emissionskomponente	ABA-VwV
Gesamtstaub	5 mg/m ³
Ammoniak	20 mg/m ³
Gasförmige anorganische Chlorverbindungen (Nummer 5.2.4 Klasse III, angegeben als Chlorwasserstoff)	20 mg/m ³
Organische Stoffe (angegeben als Gesamtkohlenstoff)	20 mg/m ³
Geruchsstoffe	500 GE _E /m ³

Gemäß ABA-VwV Nr. 5.4.8.10a dürfen, sofern aus verfahrenstechnischen Gründen wie feuchtem Abgas, unvermeidbaren Druckstößen oder zu hohem Energiebedarf Gewebefilter nicht zur Abgasreinigung eingesetzt werden können, die staubförmigen Emissionen im Abgas abweichend von Absatz 1 eine Massenkonzentration von 10 mg/m³ nicht überschreiten (ABA-VwV, 2022).

Die ABA-VwV geht bei den Anforderungen an die Anlagen bei Gesamtstaub über die der TA Luft 2021 hinaus. Zudem legt die ABA-VwV fest, dass bei Anlagen, die in Anhang 1 der 4. BImSchV mit dem Buchstaben E gekennzeichnet sind, halbjährlich Messungen von Gesamtstaub und organischen Stoffen durchzuführen sind. Überschreitet der gemessene Maximalwert den Emissionswert mit einem Vertrauensniveau von 50 % gemäß VDI 2448 Blatt 2 nicht, kann die Messung

jährlich erfolgen. Messergebnisse der letzten vier Jahre dürfen zur Auswertung herangezogen werden.

Die Emissionen der MPS-Anlagen variieren zwischen den einzelnen Standorten und sind augenscheinlich vom zu behandelnden Einsatzstoff abhängig. Als wesentlich können für MPS-Anlagen die Emissionen von Gesamtkohlenstoff sowie Gesamtstaub gelten, deren Messung an allen drei Standorten kontinuierlich erfolgt. Zusätzlich wird an zwei Standorten kontinuierlich Quecksilber gemessen, wobei die Werte deutlich unter den festgelegten Emissionsgrenzen liegen (siehe Tabelle 7). Die Grenzwerte sind gemäß den Vorgaben der TA Luft als Tagesmittelwerte definiert, wobei die Halbstundenmittelwerte das Doppelte der festgelegten Grenzwerte nicht überschreiten dürfen. (Mitarbeiter:in 1 SenUVK, Persönliche Mitteilung, 8. April 2020; 9. Juni 2020). Die Tabelle 6 zeigt die behördlich angeordneten Emissionsgrenzwerte der MPS-Anlagen EBS-1, EBS-2 und EBS-3 (Stand Oktober 2024):

Tabelle 6: Emissionsgrenzwerte der MPS-Anlagen (Stand Oktober 2024) (Mitarbeiter:in 1 "LDC", Persönliche Mitteilung, 24. Oktober 2024; Mitarbeiter:in 1 SenUVK, Persönliche Mitteilung, 28. Oktober 2024)

Anlage	EBS-1	EBS-2	EBS-3
Gesamtstaub	5 mg/m ³	5 mg/m ³	7 mg/m ³
Gesamtkohlenstoff	20 mg/m ³	50 mg/m ³	50 mg/m ³
Ammoniak	20 mg/m ³	20 mg/m ³	20 mg/m ³
Chlorwasserstoff	20 mg/m ³	20 mg/m ³	20 mg/m ³
Quecksilber	-/-	0,05 mg/m ³	0,05 mg/m ³
Geruchsstoffe	500 GE _E /m ³	250 GE _E /m ³	500 GE _E /m ³

Die Tabelle zeigt, dass die Anforderungen der ABA-VwV bei Abschluss der Recherche nicht an allen Standorten vollständig umgesetzt sind. Teilweise läuft noch eine behördliche Prüfung der Schutz- und Vorsorgeanforderungen sowie ein Dialog mit den Anlagenbetreibern, um den Inhalt möglicher nachträglicher Anordnungen festzulegen. Dies betrifft auch die geplante Verschärfung des Emissionswerts für Gesamtkohlenstoff auf 20 mg/m³, die aktuell auf Länderebene (AG Zweifelsfragen zur TA Luft / ABA-VwV) zur Diskussion steht (Mitarbeiter:in 1 SenUVK, Persönliche Mitteilung, 28. Oktober 2024).

Neben den genannten Emissionen findet die Überwachung von weiteren Emissionen diskontinuierlich statt. Dazu zählen vor allem Schwermetalle und hochgiftige Stoffe, an einem Standort aber auch Kohlenmonoxid und Stickoxide. Festzuhalten ist, dass in der Anlagenhistorie der MPS-Anlagen Grenzwerte für weitere Schadstoffe dokumentiert sind (für beispielsweise Acrylamid, Bromethan, Arsen etc.). Nach Aussage der Genehmigungs- und Überwachungsbehörde können Emissionsgrenzen entfallen, wenn sich im Laufe des Betriebs herausstellt, dass diese keine Relevanz für die Anlage haben (Mitarbeiter:in 1 SenUVK, Persönliche Mitteilung, 8. April 2020; 9. Juni 2020).

Zur Beurteilung der Evidenz der festgelegten Grenzwerte fand eine Aufarbeitung von 8 zur Verfügung gestellten Überwachungsberichten statt. Die darin dokumentierten, maximalen Emissionswerte ($Y_{\max}$, ohne Angabe der Messunsicherheit) sind neben den Grenzwerten als Median und Spanne (niedrigster dokumentierter Wert von $Y_{\max}$ - höchster, dokumentierter Wert von $Y_{\max}$) in Tabelle 7 dargestellt.

Bei der Bewertung der Daten gilt es zu beachten, dass die Anlagen „nur“ nahezu baugleich sind und keine identischen Einsatzstoffe verarbeiten. Gleichmaßen wesentlich für die Beurteilung der Messdaten ist, dass die Messorte der Emissionen variieren. Diese sind aber so gewählt, dass durch eine Verdünnung bei Mischung mit anderen Teilströmen die Aussagekraft erhalten bleibt (Mitarbeiter:in 1 SenUVK, Persönliche Mitteilung, 8. April 2020; 9. Juni 2020). Die in Tabelle 7 dargestellten Emissionswerte, aber auch die in Tabelle 6 festgehaltenen Emissionsgrenzwerte, beziehen sich auf Abgas im Normzustand (273,15 K, 101,3 kPa) nach Abzug des Feuchtegehaltes an Wasserdampf. Die Messungen erfolgten gemäß Vorgabe bei annähernder Volllast der Anlagen.

Tabelle 7: Zusammenstellung der überwachten Emissionen der MPS-Anlagen.

Komponente	Einheit	Median $Y_{\max}^b$	Min $Y_{\max}^b$	Max $Y_{\max}^b$
Gesamtstaub	mg/m ³	1,5	0,13	2,5
Gesamtkohlenstoff	mg/m ³	16,6	8	30,9
Ammoniak	mg/m ³	15,9	9,69	19,2
Chlorwasserstoff ^{a)}	mg/m ³	1,5	0,38	4,4
Quecksilber	mg/m ³	0,017	0,003	0,035
Geruchsstoffe	GE _E /m ³	2196	685	3575

a) Überwachungsmessungen teilweise unterhalb der Nachweisgrenze

b) $Y_{\max}$ bezeichnet den während der Überwachungsmessung erfassten Maximalwert der Messung OHNE Messabweichung

Die Abgasvolumenströme variieren hierbei hinter der RTO zwischen 28.200 – 33.800 m³/h (feucht), 19.500 – 23.000 m³/h (trocken) beziehungsweise 12.500 – 15.800 m³/h (Norm, trocken). Die Berichte zeigen, dass die Abgasfeuchte vom Aufgabegut abhängt, da dessen Mittelwert nicht mit den Volumenströmen korreliert.

Bei Betrachtung der Überwachungsberichte fällt eine Differenzierung der Emissionsdaten und Grenzwerte der Anlagen nach Standort auf, was auf eine Abhängigkeit vom genehmigten Einsatzstoff und dessen Eigenschaften schließen lässt. Daher ist eine standortspezifische Festlegung sinnvoll und auch umgesetzt. Für Cadmium wird an zwei Standorten bei Überwachungsmessungen der Einzelwert ermittelt, der in den Berichten aufgeführt ist. Als Emissionsbegrenzung haben diese zwei Standorte einen Summenwert mit Benzo(a)pyren. Der Summenwert überschreitet den Grenzwert nicht, wodurch der Einzelwert den Grenzwert zwangsläufig erfüllt.

Die vorgegebenen Grenzwerte werden weitestgehend eingehalten, ohne erkennbare Tendenz über die Jahre. Ammoniak (NH₃) liegt nahe dem Grenzwert, weist zudem eine starke Schwankungsbreite auf. Ammoniak entsteht bei der Vergärung. Somit ist dessen Konzentration im Abgas abhängig von der Lagerdauer im Bunker. Je mehr Zeit zwischen Anlieferung und Behandlung des Abfalls vergeht, desto geringer ist die resultierende Ammoniakkonzentration im Abgas (Mitarbeiter:in 1 Unternehmen 2 Abfallbehandlung, Persönliche Mitteilung, 2. Juni 2021). Alle Anlagen haben im Laufe der Jahre bereits Grenzwertverletzungen ausgewiesen, derartige Problem aber durch Optimierungsmaßnahmen im Hinblick auf Strömungsführung im Trockner und weitere Optimierungsmaßnahmen letztlich lösen können (Mitarbeiter:in 1 Unternehmen 2 Abfallbehandlung, Persönliche Mitteilung, 2. Juni 2021).

Alle MPS-Anlagen weisen Überschreitungen der Grenzwerte für Geruchsstoffe auf. Die Bewertung der Geruchsemissionen der Standorte ist komplex, lag nicht im Fokus dieser Studie und wird daher nicht weiter diskutiert.

1.9 Hemmnisse kontinuierlicher Messungen der Emissionen hinter MPS-Anlagen

An den Anlagen wird kontinuierlich die Überwachung der Abgasparameter Gesamtkohlenstoff, Gesamtstaub und Quecksilber durchgeführt. Dies ist aus folgenden Gründen möglich:

- ▶ Das Trocknerabgas hat einen geringen Feuchte- und Staubgehalt, was die Gefahr von Ablagerungen in der nachgeschalteten Abgasreinigung reduziert.
- ▶ Für die Trocknungsenergie wird Erdgas verwendet, das einen sehr guten Ausbrand bietet und keine Glutfetzen im Abgas erzeugt.
- ▶ Die Anlagen wurden nach 2005 in Betrieb genommen und sind daher relativ neu und von Anfang an mit moderner Abgasreinigung ausgestattet. Somit entfallen allgemeine Hemmnisse wie hohe Nachrüstungskosten oder Platzmangel.
- ▶ Durch den 24-Stunden-Betrieb der Anlagen ist die erforderliche Anzahl an Halbstundenmittelwerten gewährleistet.

Da mehrere Emissionskomponenten an allen Standorten kontinuierlich erfasst werden, kann als Hemmnis nur festgestellt werden, dass die gewählte Analysenmethode ggf. keine kontinuierliche Erfassung zulässt. Abgasseitig sind keine Hemmnisse bekannt.

1.10 Potentiale der Emissionsminderung der MPS-Anlagen

Technische Ansätze zur weiteren Emissionsminderung der MPS-Anlagen sind nachfolgend skizziert. Letztendlich muss jede Anlagenkonfiguration einer Nutzen-Kosten-Betrachtung unterzogen werden. Eine Restriktion stellt unter anderem die Anlagengröße und die Bandbreite der Abfallzusammensetzung dar. Allgemein verfügbare, teilweise bereits umgesetzte technische Maßnahmen zur Emissionsminderung sind:

- ▶ Autotherme Fahrweise RTO (höhere Umsetzungsrate der Schadstoffe allgemein, NO_x speziell) (Knoll, 2019)
- ▶ Lagerung von Abfällen (NH₃-Minderung, standortspezifische Untersuchungen, sofern ökonomisch vertretbar)
- ▶ Kombination vorhandener und zu installierender Anlagenteile (BHKW zur Stromerzeugung und Verbrennungsluftvorwärmung)
- ▶ Optimierung des Innenaufbaus der Trocknertrommel (standortspezifisch umgesetzt)
- ▶ Einsatz von Aktivkohlefiltern (standortspezifisch bereits umgesetzt).

1.11 Weiteres Optimierungspotential der MPS-Anlagen — Optionen zur Umstellung der Trocknungsverfahren auf treibhausgasneutrale Verfahren

Nach aktuellem Wissensstand sind die Anlagen weitgehend optimiert. In Abfallbehandlungsanlagen überlagern sich energieintensive mechanische und thermische Prozesse. Der energetische Gesamtprozess ist bilanziell nicht autark. Eine Nutzung des Prozessprodukts (z.B. Pellets) in einer KWK-Anlage vor Ort ist möglich. Die erzeugte Nutzenergie (Strom/Wärme) kann dem Abfallbehandlungsprozess wieder zugeführt werden.

Ein vollständiger Ersatz der eingesetzten fossilen Brennstoffe (Erdgas) ist derzeit nicht möglich, da kein alternativer Substitutionsbrennstoff qualitativ und quantitativ verfügbar ist. Abfallbehandlungsanlagen sind immer im Kontext des politischen, oft kommunalen Spannungsfeldes zu betrachten. Sie stellen direkt bzw. indirekt eine wesentliche Kostenposition in der Gebühren- bzw. Produktstruktur dar, die sich in marktkonformen Preisstrukturen widerspiegeln müssen.

Der zuvor genannte Bericht zur "Weiterentwicklung der mechanisch-biologischen Abfallbehandlung..." beschreibt deren allgemeine Entwicklungstendenzen und Optimierungspotentiale (Ketelsen & Becker, 2023). In Bezug auf die Entwicklungstendenzen behandelt der Bericht insbesondere das verstärkte Recycling von Kunststoffen. Die MPS-Standorte verfügen bereits heute über eine vergleichbar feingliedrige Vorbehandlung des Eingangsmaterials sowie eine Abscheidung von Kunststoffen (siehe Abbildung 4). Ob die Entwicklungen der Sortierung und die steigende Nachfrage dazu führen, dass eine Auftrennung der Kunststofffraktionen in einzelne Sortimente an den MPS-Standorten wirtschaftlich sinnvoll wird, lässt sich derzeit nicht abschätzen.

Der Bericht zur Weiterentwicklung der MBA zeigt außerdem verschiedene Optimierungsszenarien, darunter die verstärkte Ausschleusung recycelbarer Fraktionen (Ketelsen & Becker, 2023). Auch hier zeigt Abbildung 4, dass die MPS-Standorte bereits eine relativ hohe Ausschleusung von Wertstoffen erreichen. Ob sich diese weiter optimieren lässt, ist aktuell nicht absehbar. Eine mögliche, im Bericht genannte Option für die MPS-Standorte scheint die Substitution fossiler Brennstoffe der für Trocknung und RTO eingesetzten Brenngase durch erneuerbare Gase sowie der Einsatz einer CO₂-Abscheidung (Carbon Capture and Removal, CCR). Die wirtschaftliche Tragfähigkeit beider Optionen sollte jedoch zunächst durch eine Potenzialanalyse bewertet werden.

2 Direkte Trocknung bei der Herstellung von Asphalt

2.1 Vorwort zur Datenlage bei der Asphaltherstellung

In Deutschland existierten laut Angaben des zugehörigen Fachverbandes Deutscher Asphaltverband (DAV) e.V. zum Oktober 2020 552 stationäre Asphaltmischanlagen (AMA) (European Asphalt Pavement Association [EAPA], 2022; Mitarbeiter:in 1 Fachverband A Asphaltherstellung, Persönliche Mitteilung, 8. Oktober 2020). Es war im Rahmen dieser Studie nicht möglich, diese Vielzahl von Anlagen beziehungsweise Betreibern sowie Genehmigungs- und Überwachungsbehörden einzeln zu kontaktieren. Ferner waren berichtsrelevante Daten zum Anlagenbestand auch beim zuzuordnenden DAV, in welchem zirka die Hälfte der Anlagen organisiert sind, nicht zentral verfügbar. Die mehrfach vom DAV initiierte Beistellung von Daten durch Beantwortung der Fragebögen brachte 11 Rückläufe und kann daher nicht als repräsentativ gelten. Es existiert kein die Branche tangierendes, BVT-Merkblatt. Aktuelle, berichtsrelevante Daten existieren aus Sicht der Autoren nicht frei verfügbar.

Die im Folgenden dargestellten Angaben zum Verfahrensablauf und den technischen Details basieren hauptsächlich auf der VDI-Richtlinie 2283 „Emissionsminderung - Anlagen zur Herstellung von Asphaltmischgut (Asphaltmischanlagen)“ (VDI, 2023, Mai) sowie auf Daten einer repräsentativen Stichprobe, die direkt von Betreibern oder Beteiligungsgesellschaften bereitgestellt wurden.

2.2 Rechtliche und normative Grundlagen der Asphaltherstellung

Für AMA sind verschiedene rechtliche und normative Grundlagen relevant. Tabelle 8 fasst diese übersichtlich zusammen. AMA unterliegen aufgrund der potenziell erheblichen Umweltauswirkungen, insbesondere durch Emissionen von Luftschadstoffen, Lärm und Staub, dem Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG, 1974/2013). Entsprechend benötigen AMA eine immissionsschutzrechtliche Genehmigung, sofern diese AMA länger als zwölf Monate am selben Ort betrieben werden (Anhang 1 zur 4. BImSchV, Nr. 2.15 V) (4. BImSchV, 2017).

Zudem besitzen Asphaltmischanlagen im Normalfall Nebeneinrichtungen, bspw. zur Lagerung und Behandlung von mineralischen Abfällen, oder Lagerung von Brennstoff. Diese Nebeneinrichtungen sind zwar dem Hauptzweck der Asphaltmischanlage untergeordnet, haben aber eigene Zuordnungsnummern gemäß der 4. BImSchV und unterliegen eigenen Genehmigungsverfahren abhängig von ihrer Art und Kapazität. Da diese Nebeneinrichtungen nicht mit dem Stand der Technik von Trocknungsanlagen zusammenhängen oder die Emissionen der Trocknung beeinflussen, werden diese in diesem Bericht nicht explizit behandelt.

Das Treibhausgas-Emissionshandelsgesetz (TEHG) (TEHG, 2004/2019) gilt für AMA, wenn deren Feuerungswärmeleistung 20 MW erreicht oder überschreitet. Das Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) (KrWG, 2023) ist für Asphaltmischanlagen relevant, da es die Wiederverwertung von Ausbauasphalt zur Ressourcenschonung vorschreibt. Entsprechend ist Asphaltgranulat aus recyceltem Material zu gewinnen und zu verwenden.

Die TA Luft 2021 (TA Luft, 2021) definiert für AMA unter Abschnitt 5.4.2.15 spezifische Emissionsgrenzwerte und Maßnahmen zur Minderung von Luftschadstoffen, wie Staub, Stickoxiden und organischen Verbindungen. Darüber hinaus spezifiziert sie Anforderungen an die technische Ausstattung und den Betrieb der Anlagen, um die Einhaltung dieser Emissionswerte sicherzustellen und die Umweltbelastung zu minimieren.

Keine rechtlich bindende Wirkung besitzt die zugehörige VDI-Richtlinie 2283 zur Emissionsminderung an „Anlagen zur Herstellung von Asphaltmischgut“ (VDI, 2023, Mai). Die Richtlinie gilt

für Neuanlagen sowie bei wesentlichen Änderungen bestehender Anlagen und umfasst alle Prozessstufen von der Lagerung der Einsatzstoffe bis zur Herstellung des Asphaltmischguts.

Tabelle 8: Rechtliche und normative Grundlagen der Asphaltherstellung.

Norm / Richtlinie	Inhalt
Treibhausgas-Emissionshandelsgesetz (TEHG)(TEHG, 2004/2019)	Asphaltmischanlagen unterliegen dem TEHG, wenn die Feuerungswärmeleistung die Leistungsschwelle von 20 MW FWL erreicht oder überschreitet.
Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG, 1974/2013)	Nationaler rechtlicher Rahmen für Emissionsschutz, regelt die Genehmigungspflichten und Emissionskontrollen.
Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) (KrWG, 2023)	Bildet rechtliche Grundlage für die Wiederverwendung von Ausbauasphalt bildet und fördert die Verwertung von Asphaltgranulat in der Asphaltproduktion.
Verordnung über genehmigungsbedürftige Anlagen (4. BImSchV) [4]	Es besteht Genehmigungs- und Überwachungspflicht gemäß Nr. 2.15 V des Anhangs 1 (Vereinfachtes Verfahren gemäß § 19 BImSchG (ohne Öffentlichkeit).
TA Luft 2021 (TA Luft, 2021)	Neben allgemeinen Anforderungen (bspw. Abschnitt 5.25) ist speziell Abschnitt 5.4.2.15 (Asphaltmischanlagen) zu beachten.
VDI-Richtlinie 2283 (VDI, 2023, Mai)	Richtlinie zum Stand der Technik und Maßnahmen der Emissionsminderung bei Anlagen zur Herstellung von Asphaltmischgut.

Beim Betrieb der AMA kommen Gefahrstoffe, vor allem Bitumen und ggf. chemische Additive zum Einsatz. Daher unterliegt der Betrieb der AMA auch der Gefahrstoffverordnung (GefStoffV) allgemein (GefStoffV, 2010/2021). Die spezifischen Anforderungen und Vorgaben sind in den Technischen Regeln für Gefahrstoffe (TRGS) beschrieben, insbesondere in der TRGS 905 (TRGS 905, 2016), die sich auch auf Bitumen bezieht.

2.3 Grundsätzliche Einordnung des Anwendungsgebietes Asphaltherstellung

Asphaltmischanlagen produzieren Asphaltmischgut für den Straßenbau, dass aus Gesteinskörnungen unterschiedlicher Korngröße sowie Bitumen oder bitumenhaltigen (teils synthetischen) Bindemitteln und gegebenenfalls Zusatzstoffen besteht. Die Herstellung erfolgt meist chargenweise nach Kundenspezifikation. Das heiße Mischgut gelangt anschließend in Thermobehältern¹ zum Einbauort (Kuss, 2019). Trotz dieser Thermobehälter ist der Transport von Asphalt auf zirka 1 h ((Bürgerprotest Stadthäger Asphaltmischwerk e.V., 2022; Mansfeld et al., 2009)) von der AMA beziehungsweise einen Radius von rund 100 km (Asphalt-Thermo-Transporte GmbH, 2015) um die AMA limitiert (Geschäftsführung Beratungsunternehmen 1. Asphaltherstellung, Persönliche Mitteilung, 20. März 2020). Asphalt ist daher stark von der regionalen Nachfrage abhängig.

Produktion und maximale Anlagennutzung konzentrieren sich aufgrund der Einbauanforderungen (vor allem trockene Witterung und Mindestlufttemperaturen von -3 °C für Tragschichten bis 10 °C für diverse Deckschichten (Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen [FGSV], 2013)) auf die Sommermonate bis in den Spätherbst (Bürgerprotest Stadthäger Asphaltmischwerk e.V., 2022). Anfang der 1990er Jahre betrug die durchschnittliche Leistung der AMA 240 t/h Asphalt. Heute liegt die durchschnittliche Anlagenleistung bei 60–100 kt/a (Geschäftsführung Beratungsunternehmen 1. Asphaltherstellung, Persönliche Mitteilung, 20. März 2020), was einer Produktionsleistung von deutlich unter 200 t/h entspricht. Die meisten AMA sind auf thermische Leistungen unter 19,6 MW ausgelegt, um nicht unter die Bestimmungen des Emissi-

¹ Indirekte (An-) Forderung durch Vorgaben für die Vertragsgestaltung von Bauvorhaben seitens des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (Rundschreiben Nr. 35) Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (2016)

onshandels zu fallen (Geschäftsführung Beratungsunternehmen 1. Asphaltherstellung, Persönliche Mitteilung, 20. März 2020).

2.4 Beschreibung der Einsatzstoffe der Asphaltherstellung

Asphalt wird in einer Vielzahl von Anwendungen eingesetzt – von stark frequentierten und schnell befahrenen Straßen bis hin zu farblichen Spazierwegen in Parks und Grünanlagen. Asphaltmischgut ist daher für den vorgesehenen Verwendungszweck optimiert, woraus vielfältige Anforderungen an das Mischgut resultieren. Grundsätzlich besteht Asphalt aus Gesteinskörnungen, Bindemittel sowie ggf. Recyclingmaterial, also Ausbauasphalt (Deutscher Asphaltverband (DAV) e.V, 2022; VDI, 2023, Mai), welche anwendungsspezifisch zusammen gestellt werden:

1. Gesteinskörnungen: Natürliche und künstliche Gesteine in verschiedenen Korngrößen.
2. Bitumen: Hauptsächliches Bindemittel, das aus Erdöl gewonnen wird, auch in Form von Bitumenemulsionen.
3. Füller: Rezeptabhängig, fein gemahlene Gesteine mit Korndurchmesser < 0,063 mm.
4. Zusatzstoffe: Chemische Zusätze wie Wachse, Gummigranulate oder Zellulosefasern zur Verbesserung der Asphaltqualität und Verarbeitbarkeit.
5. Asphaltgranulat: Wiederverwerteter Ausbauasphalt.

Teer- oder Pech stellt ein historisch verwendetes Bindemittel dar. Wegen der hohen Konzentration an PAKs und Phenolen in diesem Bindemittel wurde Anfang der 1980er Jahre bei der Asphaltherstellung auf Bitumen umgestellt. Eine Wiederverwertung des teer-/pechhaltigen Straßenaufbruchs ist heute noch möglich, unterliegt aber besonderen Vorgaben und ist heute nicht mehr üblich (Martin et al., 2022; VDI, 2023, Mai).

Bitumen, ein aus Erdöl gewonnenes, dunkles, halbfestes bis hartes, klebriges Kohlenwasserstoffgemisch, wird meist heiß in Tankwagen angeliefert und ggf. warmgehalten. Zu erwähnen ist, dass der Feuchtegehalt der Gesteinskörnungen (Sande, Kiese und Splitte) der Zuschlagsstoffe, aber auch des Recyclingmaterials je nach Witterung und Lagerart (frei oder überdacht) schwanken kann, was den zur Trocknung nötigen Energieeinsatz beeinflusst (Deutscher Asphaltverband (DAV) e.V, 2022; VDI, 2023, Mai). Darüber hinaus ist die „Erwärmung und Trocknung der Gesteinskörnungen sowie des Ausbauasphalts zwingend erforderlich, damit sich diese mit dem Füller und dem Heißbitumen im Mischer zu einer homogenen Masse verbinden, da Heißbitumen auf feuchtem Ausgangsmaterial schlecht haftet.“ (Geschäftsführung Beratungsunternehmen 1. Asphaltherstellung, Persönliche Mitteilung, 21. April 2020).

2.5 Grundlegender Verfahrensablauf der Asphaltherstellung

Der Verfahrensablauf der Asphaltherstellung untergliedert sich in mehrere Teilprozesse. Im Wesentlichen sind dies (VDI, 2023, Mai):

1. Lagern und Vordosieren der Gesteinskörnungen,
2. Trocknen und Erhitzen der Gesteinskörnungen,
3. Sieben und Dosieren der heißen Gesteinskörnungen und Zusatzstoffe,
4. Lagern und Dosieren des Bitumens,
5. Mischen von Gesteinskörnungen, Bitumen und Zusatzstoffen,
6. Verladen oder Zwischenlagern von Mischgut (Asphalt).

Die wesentlichen Verfahrensschritte, ohne Berücksichtigung des Einbringens von Ausbauasphalt, welcher kalt oder erhitzt an verschiedenen Stellen des Prozesses in die Herstellung eingebracht werden kann, sind in Abbildung 6 grafisch dargestellt.

Abbildung 6: Verfahrensschema der Asphaltherstellung ohne Beachtung von Asphaltrecycling



Quelle: eigene Darstellung, DBI-Gruppe 2022

Die Lagerung der Gesteinskörnungen erfolgt in der Regel nach Korngrößen getrennt in Freilagern oder Boxen. Über Dosier- und Fördereinrichtungen gelangt das Material in die Trocknungstrommel. Durch deren Drehbewegung sowie eingebaute Leitbleche kommt das Gestein mit dem Rauchgas in Kontakt und wird durch die Trommel transportiert. Der Wärmeeintrag ist dabei sowohl durch Konvektion als auch durch Strahlungswärme gekennzeichnet. Dabei wird für die Trockentrommel das Gegenstromverfahren angewendet: Rauchgas und Trockengut strömen dabei in entgegengesetzter Richtung (VDI, 2023, Mai) durch die Trommel.

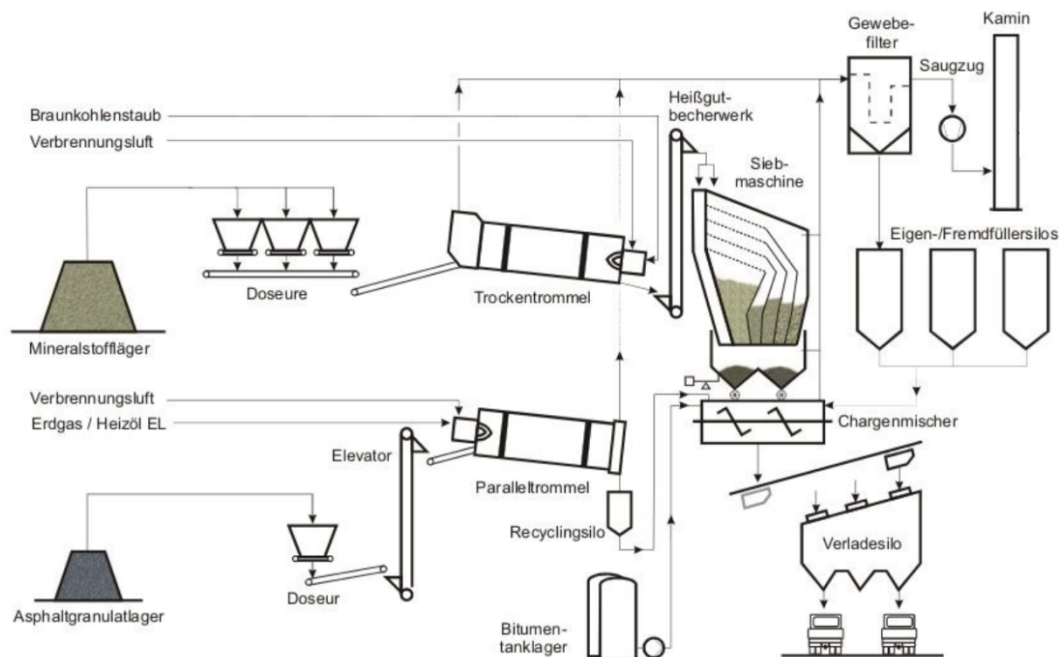
Die getrocknete Gesteinskörnung gelangt über Heißelevatoren (Fördermaschinen, eigtl. Becherwerke) in eine Siebmaschine (Vibrationssieb), wo eine weitere Trennung in verschiedene Kornfraktionen, abhängig von den verwendeten Siebbelägen, erfolgt. Die anschließende Lagerung erfolgt in darunter angeordneten Lagersilos, getrennt nach den verschiedenen Korngrößen (Heißsilierung) (Deutscher Asphaltverband (DAV) e.V, 2022).

Im nächsten Schritt erfolgt die rezeptur- und chargenbezogene Verwiegung der Mineralstoffe bzw. die Zudosierung von Gesteinsmehl (Füller), Bindemitteln (vor allem Bitumen) sowie eventuellen Zusatzstoffen entsprechend den Anforderungen an das Mischgut. Anschließend erfolgt der Transport zum Mischer. Das fertige Mischgut wird unmittelbar danach per LKW zur Baustelle transportiert (Deutscher Asphaltverband (DAV) e.V, 2022).

Die überwiegende Anzahl der Anlagen ist technisch in der Lage, Recyclingmaterial (Ausbauasphalt) aus dem Straßenbau in kalter oder warmer Form als Zuschlagstoff zu verarbeiten. Hier besteht nach (EAPA, 2022) für das Jahr 2020 lediglich eine Diskrepanz von drei Anlagen (~ 0,5 %) bei einer Gesamtzahl von 541 Anlagen, die diese Möglichkeit nicht aufweisen. Im Jahr 2020 lag die Recyclingquote nach (EAPA, 2022) für Ausbauasphalt in Deutschland bei 84 %.

Ausbauasphalt (Asphaltgranulat) gelangt über eigene Dosieranlagen in den Produktionsprozess. Es ist jedoch hinsichtlich der Anlagenemissionen nach Zugabestelle und Art der Vorbehandlung (Zugabe über Mischer, Heißbecherwerk) zu unterscheiden (Deutscher Asphaltverband (DAV) e.V, 2022). Abbildung 7 zeigt den vereinfachten Aufbau einer Asphaltmischanlage mit separaten Trockentrommeln (Paralleltrommel) für die Gesteinskörnung sowie das Recyclingmaterial. Paralleltrommeln werden im Gleich- oder Gegenstromverfahren ausgeführt.

Abbildung 7: Exemplarische Darstellung einer stationären AMA



Quelle: (Bürgerprotest Stadthäger Asphaltmischwerk e.V., 2022)

Es ist möglich, dass Standorte das Recyclingmaterial kalt zugeben, wenn bspw. eine Erwärmung für die Asphaltart nicht erforderlich ist. Nach mechanischer Aufbereitung, Zerkleinerung und Klassierung erfolgt die Zugabe des Granulats an verschiedenen Stellen des Prozesses (Heißbecherwerk, Mineralwaage, Mischer) (VDI, 2023, Mai). Die fehlende Erwärmung spart Energie, bringt jedoch Limitierungen hinsichtlich der maximalen Zugabemenge an Ausbauasphalt/ Recyclingmaterial mit sich. Rezeptabhängig sind zwischen etwa 20 Massenprozent bei Zugabe im Heißbecherwerk und ca. 50 Massenprozent bei Zugabe im Mischer umsetzbar (VDI, 2023, Mai), was deutlich unter den Werten bei Warmzugabe liegt. Je nach Anforderungen der Asphaltart sind heute Recycling-Quoten von über 90 Massenprozent realisierbar (Deutscher Asphaltverband e.V., 2014; WIRTGEN GROUP, o.D.).

2.6 Die bei der Asphaltherstellung eingesetzten Trockneranlagen im Detail

Bei der Asphaltherstellung kommen Drehrohröfen (Trommeltrockner) zum Einsatz, die in der Regel schräg gestellt sind. Das Trockengut durchläuft von der höheren Aufgabeseite zur tieferen Entnahmeseite ein Gefälle (VDI, 2023, Mai). Spezielle Einbauten (Beschaufelung) und die Drehbewegung der Trockentrommel fördern das Trockengut durch die Trockentrommel (VDI, 2023, Mai). Neigung, Rotationsgeschwindigkeit der Trommel sowie Art und Anzahl der Einbauten beeinflussen die Verweildauer des Trockenguts im Trockner. Zwischen der Trocknung von Gesteinskörnungen und Ausbauasphalt im Allgemeinen sowie der Strömungsführung bei der Trocknung von Ausbauasphalt existieren Unterschiede. Daher erfolgt die Beschreibung der Anlagen getrennt.

2.6.1 Trockner zur Erhitzung der Gesteinskörnungen

Die Transportrichtung der im Vergleich zum Ausbauasphalt unempfindlichen Gesteinskörnungen findet in der Trocknungstrommel grundsätzlich entgegen der Flamm- bzw. Heißgasrichtung, also im Gegenstromverfahren, statt. Der Brenner sitzt entsprechend gegenüber der Ausgabeseite

der Gesteinskörnung in der Stirnwand – dessen Flamme breitet sich in der Trockentrommel frei aus (VDI, 2023, Mai).

Im vorderen Bereich der Trocknungstrommel, direkt im Anschluss an die Eintragsspiralen der Aufgabeseite, sorgen überwiegend offene Schaufeln dafür, dass sich über den gesamten Querschnitt ein dichter Materialschleier ausbildet und die Gesteinskörnung in direkten Kontakt mit der Flamme tritt. Aufgrund des Fehlens organischer Bestandteile ist dies (wie auch eine etwaige Überhitzung des Materials (WIRTGEN GROUP, o.D.)) hinsichtlich der Trockneremissionen unkritisch und sorgt für eine effektive konvektive Wärmeübertragung auf das Trockengut, so dass Wärmeübergangsgrade von bis zu 90 % möglich sind (VDI, 2023, Mai).

Die Trocknungstrommel für Gesteinskörnungen ist zwischen 9 m bis 13 m lang bei einem Durchmesser, der typischerweise von 2,2 m bis 2,8 m variiert (VDI, 2023, Mai). Bei dieser Baugröße werden 100 t bis 240 t Durchsatz pro Stunde erreicht (VDI, 2023, Mai). Die installierten Feuerungswärmeleistungen reichen von 9 MW bis knapp unter 20 MW (Geschäftsführung Beratungsunternehmen 1. Asphaltherstellung, Persönliche Mitteilung, 20. März 2020; VDI, 2023, Mai), in Einzelfällen bis 24 MW (VDI, 2023, Mai).

2.6.2 Trockner zur Erhitzung von Ausbauasphalt

Die Verarbeitung von Ausbauasphalt erfordert eine präzise Temperaturkontrolle, da das enthaltene Bitumen temperaturempfindlich ist und grundsätzlich nicht zerstört werden soll. Zu hohe Temperaturen können zur Oxidation und zum Abbau des Bitumens führen. Bei einer Direktbeheizung oder einer der Direktbeheizung vergleichbaren Temperaturführung während der Trocknung und Erwärmung des Ausbauasphalts besteht daher die Gefahr, dass organische Bestandteile verdampfen oder verbrennen, was die Gesamtkohlenstoffemissionen erhöht (WIRTGEN GROUP, o.D.).

Bei der Trocknung und Erwärmung von Ausbauasphalt ist vor allem bezüglich der Strömungsführung zu unterscheiden, da diese Einfluss auf die Austrittstemperatur des Ausbauasphalts aus dem Trockner hat und damit indirekt weitere Prozessparameter der Asphaltherstellung, bspw. den Wärmewirkungsgrad der Trocknung bestimmt.

Parallele Trocknungstrommel für Ausbauasphalt, betrieben im Gleichstromverfahren:

Entsprechend der Bezeichnung, durchströmen granulierter Ausbauasphalt und Heißgas die Trockentrommel in gleicher Richtung. Neigung und Drehbewegung der Trockentrommel transportieren den Ausbauasphalt von der Brenner- bzw. Aufgabeseite zum anderen Ende, wo der Ausstrom erfolgt (VDI, 2023, Mai).

Um einen direkten Flammenkontakt des empfindlichen Bitumens mit der Flamme im Einlaufbereich zu vermeiden, erfolgt die Aufgabe des Ausbauasphalts im Einlaufbereich über spezielle Einbauten, die das Material an der Flamme vorbeiführen. Anschließend verteilen andere geformte Einbauten den Ausbauasphalt über den gesamten Trommeldurchmesser derart, dass ein möglichst dichter Materialschleier entsteht (VDI, 2023, Mai).

Dies sorgt für einen effektiven konvektiven Wärmeübergang. Im Verlauf der Paralleltrommel erreicht die Materialtemperatur des Asphaltgranulats 140 °C bis 160 °C. Der Wärmewirkungsgrad beträgt etwa 80 %. Im Auslauf der Paralleltrommel erreicht die Materialtemperatur des Asphaltgranulats bis zu 130 °C (VDI, 2023, Mai).

Die im Gleichstrom betriebenen Trocknungstrommeln haben Längen von 12 m bis 14 m und Durchmesser von 2,5 m bis 3,0 m. Gemäß VDI-Richtlinie reichen die installierten Feuerungswärmeleistungen von 8 MW bis 14 MW. Durchschnittliche Durchsätze an granuliertem Ausbauasphalt variieren von 100 t bis 180 t pro Stunde (VDI, 2023, Mai).

Parallele Trocknungstrommel für Ausbauasphalt, betrieben im Gegenstromverfahren:

Hier strömt das Heißgas entgegen der Transportrichtung des granulierten Ausbauasphalts, welche durch spezielle Einbauten, die Neigung und Drehbewegung der Trocknungstrommel erzeugt wird. Der granuliert Asphalt bewegt sich während der Trocknung also auf die Wärmequelle zu. Die eingesetzten Heißgaserzeuger befinden sich räumlich abgetrennt von der Wärmeübergangszone direkt vor oder separat neben der Paralleltrommel. Der Wärmeübergang erfolgt damit fast ausschließlich konvektiv, d.h. ohne den Einfluss der Flammstrahlung (VDI, 2023, Mai).

Vorteilhaft an der Gegenstromwärmeübertragung ganz allgemein ist, dass sich ein kontinuierlicher Temperaturgradient entlang der gesamten Länge der Trocknungstrommel einstellt. Dies ermöglicht bei vergleichbarer Eintrittstemperatur wie bei Gleichstromverfahren höhere Austrittstemperaturen des Trocknungsgutes. Ebenso ist es vorstellbar, den Prozess mit einer, im Vergleich zum Gleichstromverfahren, reduzierten Eintrittstemperaturen zu fahren, wenn es eine ähnliche Austrittstemperatur des Trocknungsguts zu erreichen gilt. Eine Wärmeübertragung mit kontinuierlichem Temperaturgradienten gilt allgemein als materialschonender (VDI, 2023, Mai; WIRTGEN GROUP, o.D.).

Im Auslauf der Paralleltrommel erreicht die Materialtemperatur des Asphaltgranulats beim Gegenstromverfahren bis zu 160 °C (WIRTGEN GROUP, o.D.)–170 °C (VDI, 2023, Mai). Gemäß VDI-Richtlinie betragen die typischerweise installierten Feuerungsleistungen mehr als 12 MW, aber weniger als 16 MW (VDI, 2023, Mai). Die Länge der Trocknungstrommel beträgt ca. 10 m bis 12 m, der Durchmesser wird mit ca. 2,5 m bis zu 3,0 m angegeben (VDI, 2023, Mai). Die Trocknungsleistungen erreichen bei einer Temperaturdifferenz zwischen Trockengut und Heißgas von etwa 150 K maximal 150 t/h bis 200 t/h. Der Wärmewirkungsgrad liegt bei etwa 90 % (VDI, 2023, Mai).

Mittenzugabe: Bei der Mittenzugabe erfolgt die Zugabe des granulierten Ausbauasphalts kalt, und zwar mittig der Trocknungstrommel für die Gesteinskörnungen. Erwärmung und Trocknung des Ausbauasphalts finden somit über den Kontakt mit dem heißen Gestein statt. Dem geringeren apparativen Aufwand stehen Limitierungen hinsichtlich des maximal möglichen Massenanteils an Ausbauasphalt gegenüber. Auch sind die Absiebung und Einwaage der Gesteinskörnung ist weniger genau, was die produzierbaren Asphaltrezepte weiter einschränkt (VDI, 2023, Mai).

2.6.3 Statistische Analyse des Anlagenbestands der AMA in Deutschland

Die Beschreibung des Standes der Technik von Asphaltmischanlagen basiert, wie beschrieben, im Wesentlichen auf dem veröffentlichten Entwurf der zugehörigen, überarbeiteten VDI-Richtlinie 2283 zur Emissionsminderung von Anlagen zur Herstellung von Asphaltmischgut (VDI, 2023, Mai). Zusätzlich wurde eine Erhebung auf der Basis eines signifikanten Anteils (ca. 1/3) der in Deutschland vorhandenen Anlagen durchgeführt (Mitarbeiter:in 1 Unternehmen 1 Asphalttherstellung, Persönliche Mitteilung, 3. Juni 2020). Die Ergebnisse sind in Tabelle 9 kurz zusammengefasst.

Tabelle 9: Kennwerte einer repräsentativen Auswahl von Asphaltmischanlagen (Mitarbeiter:in 1 Unternehmen 1 Asphalttherstellung, Persönliche Mitteilung, 3. Juni 2020)

Merkmal	Wert	Bemerkung
Brennerleistung (MW)	16,6 MW	Median
Trocknungsleistungen	190 t/h	Median
Brennstoff (Haupt)	BKS mit Heizölstützflamme	> 90% in Deutschland

Merkmal	Wert	Bemerkung
Durchmesser	2,4m	Median
Jahresnutzung (h)	200-1800 h	
Alter Trommel	2007	Median

Der Median der Brennerleistung der Stichprobe liegt bei 16,6 MW und damit unterhalb der Grenze für die Befreiung vom Emissionshandel. Der Median der Trocknerleistung an Gestein ist 190 t/h. Die Trommeln haben einen Durchmesser von etwa 2,4 m (Mitarbeiter:in 1 Unternehmen 1 Asphaltherstellung, Persönliche Mitteilung, 3. Juni 2020) und sind nach Angaben eines namenhaften Herstellers zwischen 8 und 12 m lang. Sowohl in den Trockentrommeln für Gesteinskörnungen als auch für Ausbauasphalt sind verschiedene Einbauten zur Durchmischung und Förderung des Trockengutes eingebaut. Das Alter der Trommeln beträgt gemäß Stichprobe durchschnittlich 15 Jahre, wobei bei der Förderung eines derart stark abrasiven Gutes davon auszugehen ist, dass die dargestellten Einbauten in deutlich kürzeren Intervallen ausgetauscht werden. Als Brennstoff wird überwiegend Braunkohlestaub eingesetzt, was nach Angaben des DAV bei über 90 % der AMA in Deutschland der Fall ist [2].

Die Werte der Stichproben passen demnach gut zu den Angaben der VDI-Richtlinie 2283 (VDI, 2023, Mai). Gemäß letzterer weisen Trockentrommel für Ausbauasphalt tendenziell größere Durchmesser auf und sind, wenn im Gleichstromprinzip beheizt, länger. Ob dies dem besseren Wärmeübergang beim Gegenstromprinzip geschuldet ist oder andere Ursachen hat (bspw. höhere Anlagenleistung), konnte nicht geklärt werden.

Um zu ermitteln, wie viele Anlagen in Deutschland Ausbauasphalt kalt oder warm verarbeiten, aber auch um die Anzahl der AMA mit kontinuierlicher Emissionserfassung für Gesamtkohlenstoff einzugrenzen, wurde auf Basis der Daten der genannten Stichprobe eine Hochrechnung der Verteilung des Anlagenbestandes in Deutschland durchgeführt. Mit Hilfe des gegebenen Medians der Stichprobe wurde die untere Grenze p_u und die obere Grenze p_o nach dem Clopper-Pearson-Intervall-Verfahren bestimmt. Das Konfidenzniveau für die Berechnungen beträgt 95 %, d. h. mit einer Wahrscheinlichkeit von 95 % liegt der wahre Wert innerhalb der in Tabelle 10 (Gesamtkohlenstoff == Gesamt-C) angegebenen oberen und unteren Grenzen.

Tabelle 10: Hochrechnung zu anlagenspezifischen Daten deutscher Asphaltmischanlagen plus Konfidenzintervall mit einem Konfidenzniveau von 95 %

	Untere Grenze (Anzahl)	Median (Anzahl)	Obere Grenze (Anzahl)
Kaltzugabe von RC	225	267	308
Davon Mischerzugabe	219	261	302
Davon Mittenzugabe	17	34	59
Davon Heißelevatorzugabe	66	95	130
Warmzugabe RC (Paralleltrommel)	149	187	228
davon Gegenstrom	2	9	26
davon Gegenstrom und HGE	19	37	63
davon Gleichstrom	53	80	113
davon Gleichstrom und HGE	1	6	22

*RC- Recyclinganteil

**HGE - Heißgaserzeuger

Auf den ersten Blick ergeben sich bei der Hochrechnung bereits für den Median Widersprüche. So übersteigt die Summe der AMA mit Mischerzugabe, Mittenzugabe und Heißelevatorzugabe den Median der Hochrechnung für AMA mit Kaltzugabe für RC. Die Erklärung hierfür ist, dass AMA mehrere Zugabemöglichkeiten bzw. Aufbereitungsmöglichkeiten für Ausbauasphalt (RC) besitzen und diese rezepturabhängig einsetzen. Betrachtet man die Tabelle 10, so ist weiterhin festzustellen, dass die Kaltzugabe von Ausbauasphalt die vorherrschende Zugabeart ist. Der maximal mögliche Anteil an Ausbauasphalt ist entsprechend den Ausführungen in (VDI, 2023, Mai) begrenzt.

In den letzten Jahren hat sich die Anzahl der in Deutschland betriebenen Asphaltmischanlagen leicht verringert und letztlich auf einem Niveau von rund 550 eingependelt (Mitarbeiter:in 1 Fachverband A Asphaltherstellung, Persönliche Mitteilung, 8. Oktober 2020). Diese Angabe weicht leicht von der im Jahresbericht 2020 des europäischen Verbands für Asphaltstraßenbau EAPA wiedergegebenen Anzahl von 541 ab (EAPA, 2022). Dies ist im Vergleich zum europäischen Ausland eine große Anzahl an Anlagen. Bezogen auf die Gesamtfläche des Landes weist Deutschland mit Ausnahme der Schweiz die höchste Flächendichte an Asphaltmischanlagen auf. Ein ähnlich dicht besiedeltes Land wie die Niederlande weist, mit Verweis auf Tabelle 11, nur eine halb so hohe Flächendichte auf.

Im europäischen Vergleich deuten die nationalen Zahlen auf einen entsprechenden Wettbewerbsdruck hin, aber auch auf eine stark schwankende Nachfrage an den einzelnen Standorten, die von den lokalen Bauvorhaben abhängig ist. Dies führt dazu, dass die Anlagenauslastung bzw. Produktionskapazität standortbezogen unterschiedlich ausfällt. Hervorzuheben ist, dass insgesamt 454 Anlagen (Kalt- + Warmzugabe) und damit rund 82 % Recyclingmaterial, d.h. Ausbauasphalt, verarbeiten. Dies ist im europäischen Vergleich ein hoher Anteil (EAPA, 2022).

Tabelle 11: Produktionsstätten für Asphalt in Europa, basierend auf dem EAPA Jahresbericht 2020 (EAPA, 2022), erweitert um die Spalten 5–6

Land	Stationäre AMA	Mobile AMA	Anlagen für Ausbauasphalt**	Landes-fläche	Fläche / Anlagen
				km ²	km ² /n
Deutschland	541	N/A	538	357588	661,0
Tschechien	103	2	78	78866	765,7
Italien *	380	20*	N/A	301338	793,0
Belgien	36	0	15	30688	852,4
Dänemark	38	N/A	37	42921	1129,5
Slowenien	16	2	6	20273	1267,1
Niederlande	32	1	N/A	41543	1298,2
Frankreich *	423	40	>370	632733	1495,8

N/A- keine Angabe

* Eine oder mehrere Anlagen werden von der Straßenverwaltung und/oder den Gemeinden betrieben und sind in deren Besitz,

** Summe der stationären und mobilen Anlagen + heißes/kaltes Recycling, dies können alle Typen sein, z. B. Chargenanlagen und/oder Trommelmischanlagen und/oder Anlagen mit Paralleltrommel.

Die vorliegenden 11 Berichte über wiederkehrende Messungen zur Überprüfung der Einhaltung der Emissionsbegrenzungen gemäß Genehmigungsbescheid, die mit erheblichem Aufwand direkt beim Betreiber eingeholt wurden, weisen ausschließlich eine Gegenstromführung aus. Sieben Anlagen sind mit einer oder zwei Zugabeeinrichtungen für Ausbauasphalt (Asphaltgranulat) ausgerüstet. Zur Herstellung bestimmter Mischgutsorten erfolgt die Zugabe von Ausbauasphalt (RC) in den Heißelevator und/oder Mischer. Zwei Messberichte dokumentieren auch den Betrieb einer Paralleltrommel, wobei das erhitzte Granulat im Mischer mit der Gesteinskörnung vermischt wird. Eine Verallgemeinerung ist hier aufgrund der begrenzten Anzahl der vorliegenden Messberichte sowie der Aussagekraft der Hochrechnung basierend auf der vorliegenden Stichprobe (siehe Tabelle 10) nicht zulässig.

2.6.4 Brennstoffeinsatz bei der Asphaltherstellung

Als Brennstoffe kommen in der AMA Braunkohlenstaub (BKS), Heizöl EL, Erdgas und Flüssiggas zum Einsatz (EAPA, 2022), wobei der DAV den Anteil von BKS bezogen auf den Gesamtbestand an AMA in Deutschland mit mehr als 90 % angibt (Mitarbeiter:in 1 Fachverband A Asphaltherstellung, Persönliche Mitteilung, 8. Oktober 2020).

Die Energieverbräuche zeigen eine starke Abhängigkeit von der Ausgangsfeuchte der Gesteinskörnung oder Ausbausphalts. Während bspw. bei 6 % Ausgangsfeuchte 98,4 kWh pro Tonne Gesteinskörnung für Aufheizung und Trocknung erforderlich sind, beträgt dieser Wert bei 5 % Ausgangsfeuchte noch 88,8 kWh/t und bei 2 % Ausgangsfeuchte nur noch 61,5 kWh/t. Diese Energieverbräuche beziehen sich auf den Trockenvorgang an sich, berücksichtigen keine weiteren Verluste.

Letztlich liegen für die Trocknung und Erwärmung der Gesteinskörnungen typische spezifische Energieverbräuche zwischen 70 kWh/t und 110 kWh/t Asphaltmischgut vor (VDI, 2023, Mai). Der spezifische Energieverbrauch für die Trocknung und Erwärmung von granuliertem Ausbau-

asphalt liegt im Bereich von 70 kWh/t bis 110 kWh/t Asphaltmischgut beim Gleichstromverfahren. Für das Gegenstromverfahren liegen hingegen keine spezifischen Energieverbräuche pro Tonne erzeugten Asphaltmischguts vor (VDI, 2023, Mai).

2.7 Abgasleitung und Abgasnachbehandlung bei der Asphaltherstellung

Das Trocknen und Erhitzen von Gesteinskörnungen und/oder Asphaltgranulat stellen bedeutende Emissionsquellen in AMA dar. Laut der entsprechenden Richtlinie erfolgt an diesen Stellen eine Absaugung der Emissionen, sofern dies möglich ist. Die abgesaugten Abgase werden über festinstallierte Rohrleitungen zu einer Filterentstaubung geführt und anschließend über einen Schornstein abgeleitet (VDI, 2023, Mai).

Die Abgasnachbehandlung hinter den Trocknern für Gesteinskörnungen ist in der Regel zweistufig aufgebaut, bestehend aus einem Vorabscheider und einem filternden Abscheider. Das im Vorabscheider abgetrennte Material dient direkt als Grobfüller, wobei dessen Zugabe im Heißbecherwerk erfolgt. Das im filternden Abscheider gewonnene Material kommt entweder unmittelbar zum Einsatz oder wird zwischengelagert und dosiert über ein Puffersilo als Feinfüller im Mischprozess eingesetzt. Der so gereinigte Abgasstrom weist an der Schornsteinmündung 70 °C und 110 °C auf, um eine Unterschreitung des Taupunkts und damit verbundene Säurebildung zu vermeiden. (VDI, 2023, Mai).

Die Abgasströme der Gleichstromtrockner für granulierten Ausbauasphalt erfasst eine am Trocknerausgang installierte Absaughaube. Ein Teilstrom des Trocknungsbrüdens, der beim Gleichstromverfahren am Trockneraustritt eine Temperatur von 140 °C bis 160 °C aufweist, strömt zurück und tritt über die Stirnwand der Trocknungstrommel wieder ein. Der nicht zurückgeführte Teilstrom passiert einen filternden Abscheider und entweicht anschließend über den Schornstein in die Atmosphäre (VDI, 2023, Mai).

Die Abgasführung von Gegenstromtrocknern für Ausbauasphaltgranulat scheint konstruktiv der Beschreibung im letzten Abschnitt zu entsprechen. Die Abgastemperaturen sind niedriger als beim Gleichstromverfahren und liegen über dem Taupunkt (WIRTGEN GROUP, o.D.), aber unter 120 °C (VDI, 2023, Mai). Die VDI-Richtlinie beschreibt, im Unterschied zu den Anlagen im Gleichstromverfahren, lediglich eine zusätzliche Kammer hinter der Abgashaube. Diese Kammer soll der Senkung der Strömungsgeschwindigkeit und dem Abscheiden der Feinanteile dienen (VDI, 2023, Mai). Auch bei diesem Verfahren rezirkuliert ein Teil des Abgases (VDI, 2023, Mai). Dessen Restwärme senkt den im Heißgaserzeuger erforderlichen Energieaufwand (VDI, 2023, Mai). Der nicht zurückgeführte Teilstrom strömt durch einen filternden Abscheider und gelangt über den Schornstein in die Atmosphäre (VDI, 2023, Mai).

Die eingesetzten filternden Abscheider sind gemäß der VDI Richtlinie 3677 Oberflächenfilter, vermutlich Schlauchfilter, die als reine Partikelfilter organische Aerosole maximal anhaftend am Staubkorn mit entfernen können (VDI, 2021, Dezember). Es ist anzunehmen, dass das eingesetzte Filtermaterial nicht hochtemperaturfest ist, da kein Verweis auf die VDI 3677 Blatt 3 erfolgt. Die vorliegenden knapp 10 Berichte zu behördlich angeordneten Überwachungsmessungen dokumentieren in allen Fällen den Einsatz von Gewebefiltern aus Aramid-Nadelfilz. Diese Berichte umfassen die Emissionsfassung von Mischer und Trockentrommel der Gesteinskörnung. Bei Anlagen mit Paralleltrommel erfolgt die Emissionsfassung zusätzlich an dieser, sowie bei einer Anlage an Kübelbahn und Übergabestellen.

Eine Verallgemeinerung der Ergebnisse ist aufgrund der geringen Anzahl der vorliegenden Messberichte im Verhältnis zur Gesamtzahl der installierten Anlagen nicht zulässig.

2.8 Behördlich überwachte trockenungsbeeinflusste Emissionen der AMA

2.8.1 Gesetzliche Forderungen an die Emissionsüberwachung der AMA

Es existieren keine europäischen Gesetzestexte oder Rechtsnormen, die spezifische Emissionswerte für Asphaltmischanlagen enthalten. Von daher ist die TA Luft 2021 die wichtigste Quelle für konkrete Emissionsgrenzwerte und technische Anforderungen. Neben Emissionsgrenzwerten legt diese auch Fristen für die Umsetzung bei Bestandsanlagen fest.

Mit Novellierung der TA Luft haben sich die Anforderungen für Asphaltmischanlagen verschärft. Tabelle 12 fasst die spezifischen Grenzwerte nach TA Luft zusammen (TA Luft, 2021):

Tabelle 12: Grenzwerte nach TA Luft 2021 für Asphaltmischanlagen

Emission	Grenzwert
Staubförmige Emissionen, angegeben als Gesamtstaub	0,01 g/m ³
Kohlenmonoxid	0,50 g/m ³
Karzinogene Stoffe (Klasse III und Benzol)	5 mg/m ³ ^{a)}
Formaldehyd	15 mg/m ³ ^{b)}

a.) 1 mg/m³ ist anzustreben

b.) bei gasförmigen Brennstoffen, für sonstige Brennstoffe 10 mg/m³

Diese spezifischen Emissionsgrenzwerte beziehen sich auf einen Volumengehalt an Sauerstoff im Abgas von 17 Volumenprozent, abweichend für Thermalölheizaggregate auf 3 Volumenprozent Restsauerstoffgehalt Sauerstoff im Abgas. Neben den spezifischen Grenzwerten enthält die TA Luft 2021 weitere Anforderungen an die Asphaltmischanlagen, welche folgend kurz stichpunktartig aufgeführt werden (TA Luft, 2021):

► **Bauliche Anforderungen:**

- Lagerung von Gesteinskörnungen ≤ 2 mm ("Natur- und Brechsande") in Silos oder ähnlichem zur Minderung des Feuchteintrags,
- Asphaltgranulat und Asphaltfräsgut sind ebenfalls vor Feuchteintrag zu schützen.

► **Abgaserfassung:**

- Fassung der staubhaltigen Abgase der Mineralstoff-Trockentrommel, der Asphaltgranulat-Trommel (Paralleltrommel), der Transporteinrichtungen für das Heißmineral, der Siebmaschine und des Mischers und Zufuhr zu einer Entstaubungseinrichtung.

► **Prozess-/ Temperaturführung:**

- Möglichkeiten der Temperaturminderung des Herstellungsprozesse von Asphalt sind auszuschöpfen,
- Kontinuierliche Aufzeichnung und Aufbewahrung (5 Jahre) der Temperaturverläufe:
 - des erhitzten Asphaltgranulats am Paralleltrommelaustritt,
 - der erhitzten Gesteinsmischung am Trockentrommelaustritt,
 - des Mischgutes am Mischeraustritt.

► Wartung und jährliche Prüfung der:

- Brenneinstellungen,
- Filterfunktionsfähigkeit,
- Verschleißerscheinungen an den Trommeleinbauten.

Des Weiteren bestimmt die TA Luft 2021, dass bestehende Anlagen ab dem 1. Dezember 2029 die Anforderungen an organische Emissionen erfüllen müssen. Dies betrifft Emissionen aus dem Bereich des Mischerauslaufs, den Übergabestellen nach dem Mischer, den Transporteinrichtungen für das Mischgut sowie den Übergabestellen in die Verladesilos.

2.8.2 Abgasströme und Abgaslasten der bei der Asphaltherstellung eingesetzten Trocknungstechnik

Die vorliegenden neun Überwachungsberichte der Asphaltmischanlagen stellen keine hinreichende Datengrundlage zur Bewertung der Emissionen von Asphaltmischanlagen dar. Eine umfangreiche Sammlung an Emissionsdaten ist in Tabelle 4 der VDI 2283 enthalten (VDI, 2023, Mai). Daraus werden die für die vorliegende Studie relevanten Luftschadstoffe zitiert. Die Darstellung erfolgt gekürzt in Tabelle 13.

Die Tabelle unterteilt die Emissionen nach Anlagentypen und gliedert sie in Anlagen ohne Zugabe von granuliertem Ausbauasphalt (nur Neumaterial), Anlagen mit bis zu 40 % RC-Zugabe (typisch für Kaltzugabe), und Anlagen mit mehr als 40 % RC-Zugabe (typisch für Warmzugabe). Jede dieser Kategorien wird weiter unterteilt nach den eingesetzten Brennstoffen: HEL (Heizöl leicht), Gas (Erdgas) und BKS (Braunkohlestaub).

Die Tabelle listet brennstoffabhängig für die jeweiligen Emissionskomponenten organische Stoffe (Gesamtkohlenstoff), Formaldehyd und Gesamtstaub den jeweiligen Medianwert (Mdn). Zudem gibt die Tabelle, ebenfalls pro Emissionskomponente und weiter untergliedert pro Brennstoff, Auskunft über die Anzahl der Anlagen (n), die sich in einem bestimmten Wertebereich finden.

Auffällig und in Übereinstimmung mit den bisherigen Ausführungen ist, dass die Mehrheit der Anlagen Ausbauasphalt recyceln kann. Den Angaben des Fachverbandes zufolge stellt Braunkohlestaub für die meisten Standorte den hauptsächlich eingesetzten Brennstoff dar, was sich auch aus den Daten der Tabelle herauslesen lässt. Des Weiteren sind, sich am Median orientierend, keine signifikanten Grenzwertüberschreitungen erkennbar. In Bezug auf die ungekürzte Fassung der Tabelle, enthalten in der VDI 2283, lässt sich jedoch feststellen, dass die mit Braunkohlestaub beheizten Trocknungsanlagen deutlich höhere Emissionswerte bei typischen Feuerungsabgasen (Kohlenmonoxid, Stickoxide, Schwefeldioxid) aufweisen (VDI, 2023, Mai).

Tabelle 13: Emissionsdaten von Asphaltmischanlagen, gekürzte Darstellung, entnommen aus der VDI 2283.

Asphalt Herstellung		Ohne RC-Zugabe (nur Neumineral)						bis 40 % RC-Zugabe (typisch für Kaltzugabe)						> 40 % RC-Zugabe (typisch für Warmzugabe)					
Brennstoff		HEL		Gas		BKS		HEL		Gas		BKS		HEL		Gas		BKS	
Emissionskomponente	in mg/m ³	n	Mdn ¹⁾ [mg/m ³]	n	Mdn ¹⁾ [mg/m ³]	n	Mdn ¹⁾ [mg/m ³]	n	Mdn ¹⁾ [mg/m ³]	n	Mdn ¹⁾ [mg/m ³]	n	Mdn ¹⁾ [mg/m ³]	n	Mdn ¹⁾ [mg/m ³]	n	Mdn ¹⁾ [mg/m ³]	n	Mdn ¹⁾ [mg/m ³]
Org. Stoffe (Gesamt-C)	< 50	5		5		18		40		7		220		17		4		120	
	50...100	1	29	1	22	1	18	3	25	2	30	17	29	6	45	1	39	19	41
	> 100	0		0		0		0		0		1		1		0		1	
	< 1			0		1		10		1		23		0		1		3	
Formaldehyd ²⁾	1...5			1		5		11		1		34		4		0		28	
	> 5		-	0	1,2	0	2,2	4	1,7	3	11,8	3	1,2	4	5,1	0	0,7 ⁴⁾	27	4,33
	< 5	4		3		12		23		6		134		17		4		77	
Gesamtstaub ³⁾	5...15	1	3	2	3	8	4	11	3	2	3	57	3	1	2	1	5	29	3
	> 15	1		1		1		7		1		41		6		0		31	

Mdn- Median

n Anzahl der Messwerte

1) bezogen auf einen Sauerstoffgehalt von 17 % Volumenanteil

2) Messergebnisse für Formaldehyd stammen aus dem Zeitraum bis 2017

3) keine Umrechnung auf den Bezugssauerstoffgehalt bei O₂ < 17 % Volumenanteil

4) Für diesen Betriebszustand liegt ein weiteres Messergebnis (76,4 mg/m³) vor, dessen Repräsentativität aber zweifelhaft ist. Der Wert wurde bei der Auswertung nicht berücksichtigt.

2.9 Hemmnisse für kontinuierliche Emissionsüberwachung an Asphaltmischanlagen

Bei Anlagen, bei denen der Massenstrom organischer Stoffe, angegeben als Gesamtkohlenstoff für Stoffe nach Nummer 5.2.5 TA Luft 2021 2,5 kg/h überschreitet, besteht gemäß 5.3.3 die Betreiberpflicht, die relevanten Quellen mit Messeinrichtungen zur kontinuierlichen Erfassung von Gesamtkohlenstoff auszurüsten (TA Luft, 2021). Diese Forderung ist nicht neu, besteht formell seit 15 Jahren, wurde aber bei Asphaltmischanlagen behördlich so gut wie nie gefordert (Schröter, 2018). Betroffen von dieser Forderung sind Anlagen, für die gilt:

- ▶ Die Emissionsquelle trägt zu ≥ 20 Massenprozent zum Gesamten Emissionsstrom bei oder überschreitet die Massenströme der Nr. 5.3.3.2,
- ▶ Die Anlage emittiert jährlich ≥ 500 h.

Dies trifft nach (Schröter, 2018) für Anlagen zu, für die bei Gesamtkohlenstoff ein Emissionswert von 50 mg/m^3 festgelegt ist, wenn der Abgasvolumenstrom am Schornstein der Asphaltmischanlage größer als $50.000 \text{ Nm}^3/\text{h}$ ist.

Die kontinuierliche Überwachung der Gesamtkohlenstoffemissionen wird seit einigen Jahren intensiv zwischen Betreibern, Behörden und Verbänden diskutiert. Der Betrieb solcher Messeinrichtungen in Deutschland ist durch verschiedene Stellungnahmen abgesichert und kann vorsichtig mit 15 Anlagen abgeschätzt werden. Ebenso gibt es „Bundeseinheitliche Vorgaben für die Parametrierung von Auswerteeinrichtungen für die kontinuierliche Gesamtkohlenstoff-Überwachung bei Asphaltmischanlagen“ (Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Immissionsschutz [LAI], 2019), ein zum Teil kritisierte, mit den Behörden abgestimmter Expertenvorschlag, der auf der Verwaltungsvorschrift zur „Bundeseinheitlichen Praxis bei der Überwachung der Emissionen“ (BEP, 2017) basiert. Im Folgenden werden die von Betreibern (Mitarbeiter:in 2 Unternehmen 1 Asphaltherstellung, Persönliche Mitteilung, 5. Mai 2021), Behörden (Mitarbeiter:in 1 RP_Freiburg, Persönliche Mitteilung, 30. April 2021) und Verbänden (Geschäftsführung Beratungsunternehmen 1. Asphaltherstellung, Persönliche Mitteilung, 24. März 2021) vorgebrachten Argumente stichpunktartig zusammengefasst.

Stellungnahme Behörde (Mitarbeiter:in 1 RP_Freiburg, Persönliche Mitteilung, 30. April 2021):

- ▶ Eignungsgeprüfte und zertifizierte Mess- und Auswerteeinrichtungen sind seit ca. 4 Jahren in Betrieb und laufen ohne technische Probleme,
 - Auswerteeinrichtung von SICK Typ: MEAC 300 (Auswertung) ist am Markt verfügbar,
 - Aufwand für Temperierung (vermutlich 180°C) der Messleitungen erhöht,
 - Kosten der kontinuierlichen Messeinrichtung liegen bei ca. 120–150 k€,
 - Laufende / wiederkehrende Kosten für Strom / Kalibrierung / Wartung sowie Abschreibungskosten für die kontinuierliche Messeinrichtung (über 10 Jahre), abgeschätzt mit ca. 1 % des Produktpreises pro Tonne, scheinen vertretbar,
- ▶ Durch strategisch gute Planung der Kalibrierung (nahe oder über dem Grenzwert) bisher keine Neukalibrierung nötig,
- ▶ Einwände gegen neue Parametrierung (LAI, 2019), von Auswerteeinrichtungen nur bedingt nachvollziehbar:

- Relevante Emissionen sind auch Ausreißer (insbesondere An- und Abfahrvorgänge) und daher zu berücksichtigen,
- Die Betriebsart "Anfahren Kaltstart" ist für die Komponente Gesamtkohlenstoff von der Beurteilungspflicht aus betriebstechnischen Gründen ausgenommen. Die Ausnahme ist berechtigt sowie verhältnismäßig, da die Zeitdauer für "Anfahren Kaltstart" eng begrenzt und pro Tag gering ist,
- ▶ Eine kontinuierliche Messung hat Potential, negative oder emissionslastige Betriebszustände / Mischungen kontinuierlich zu erfassen und entsprechend einzugreifen,
- Nach Betreiberangaben lässt sich die Anlage bei Einsatz kontinuierlicher Gesamtkohlenstoff Messung schonender betreiben, womit sich ein Überfahren der Asphaltmischanlage ausschließt,
- Daraus resultieren eine Reduzierung des Energieverbrauches, des Wartungsaufwandes in der Anlage sowie eine Steigerung der Bindemittelqualität.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass nach Einschätzung der Behörde die Technik verfügbar ist, störungsfrei betrieben werden kann und der Betrieb einen Nutzen hinsichtlich der Emissionsminderung hat. Die Kosten erscheinen aus Sicht der Behörde vertretbar (Mitarbeiter:in 1 RP_Freiburg, Persönliche Mitteilung, 30. April 2021) bzw. überwiegt ganz generell der Umweltnutzen der Maßnahme (Mitarbeiter:in 1 RP_Freiburg, Persönliche Mitteilung, 30. April 2021), die Einwände gegen das veröffentlichte Parametrierungskonzept für AMA (LAI, 2019) sind nach Darstellung der Behörden nicht nachvollziehbar.

Stellungnahme Betreiber (Mitarbeiter:in 2 Unternehmen 1 Asphaltherstellung, Persönliche Mitteilung, 21. April 2021):

- ▶ Technisch funktionieren die Messungen, laufen kontinuierlich, auch wenn AMA nicht in Betrieb ist (Asphalt produziert),
- ▶ Aufwand / Nutzen beziehungsweise Verhältnismäßigkeit nicht gegeben, da:
 - Durchschnittlich 2–3, max. 10–20 Betriebsstunden an den Anlagen [500 bis 1.500 Stunden im Jahr, nur knapp über der Schwelle der TA Luft],
 - Typischerweise 2–3 Mitarbeiter, kein für Auswertung trainiertes / ausgebildetes Personal,
 - Verschiedene Produkte "just in time", daher häufige Anfahr-, Umstell- und Abfahrvorgänge, kein kontinuierlicher Betrieb,
- ▶ Bundeseinheitliche Praxis für Auswertung kontinuierlicher Messungen (BEP, 2017) bedingt, dass mindestens 12 Halbstundenmittelwerte in Tagesmittelwert einfließen, aber:
 - diese Anzahl an Messwerten schafft wegen meist fehlender Auslastung nur eine geringe Zahl der Anlagen,
 - Abänderung und Veröffentlichung des aktuellen Parametrierungskonzeptes für AMA (LAI, 2019) erfolgte ohne weitere Rücksprache

- Reduktion der Mindestanforderung auf 3 Halbstundenmittelwerte für einen gültigen Tagesmittelwert führt zu signifikanter Steigerung der Anfälligkeit für Ausreißer, daraus lässt sich eine deutliche Verschärfung des Grenzwerts von 50 mg/m³ ableiten,
- Zugelassene Messmittel sind nicht einfach adaptierbar an neues Konzept,
- Kosten für Umrüstung und Betrieb unverhältnismäßig im Vergleich zum Umsatz:
- Jährlich ca. 40 Mio t Asphalt, eher kleine Branche (im Vgl. zu Zement/Stahl)
- Einmalige Kosten bei einer AMA ca. 244 k€ (detaillierte Aufschlüsselung siehe Tabelle 14), nur sinnvoll für große Standorte mit entsprechender Auslastung oder Neuanlagen,
- Zusätzliche Kosten, vor allem durch Wartung und erhöhten Stromverbrauch (80.000 kWh, 10–20 % des jährlichen Stromverbrauchs einer Anlage),
- gemäß aktueller Rechtsprechung (Verwaltungsgericht Würzburg) ist der Einsatz von FID in Neuanlagen mit einem Investitionsvolumen von 3,4 Mio. € unverhältnismäßig,
- gilt umso mehr bei nachträglicher Anordnung ohne Änderung der Anlagentechnik / des Genehmigungsbestands (Verwaltungsgerichts München),
- Einsatz kontinuierlicher Messtechnik dient dem Ziel der Emissionsreduzierung und Ressourcenschonung wenig, da:
- Genese von Organik entsteht vorrangig aus Bitumen und Recyclingmaterial, strengere Grenzwerte / Parametrierungskonzept führen daher zu weniger Wiederverwertung von Ausbaumaterial (heute 60–90%),
- Herstellung von Asphalt stark kundenorientiert basierend auf festen Rezepten, daher nicht einer Steuerung an Rezepte, Bindemittel, Temperaturen zugänglich, bei Grenzwertverletzung nur Herunterfahren der Anlage als Reaktion
- Nach derzeitigem Kenntnisstand gelten der Anteil Asphaltgranulat und Anbackungen in Trommel für erhöhte Gesamtkohlenstoffemission als ursächlich, was auch bei diskontinuierlicher Überwachung detektierbar ist (Aufwand / Nutzen nicht gegeben)
- Installation der Messeinrichtungen steigert Stromverbrauch (Beheizung Entnahmesonde, Betrieb der Messgeräte, Rechner, Klimaanlage und Kompressor) und damit Emissionen.

Auch die Betreiberseite bestätigt die Möglichkeit des Einsatzes von kontinuierlicher Messtechnik an AMA's (Mitarbeiter:in 2 Unternehmen 1 Asphaltherstellung, Persönliche Mitteilung, 21. April 2021). Kritisiert wird das aus Sicht des Betreibers nicht oder nur unzureichend abgestimmte Parametrierungskonzept (LAI, 2019), das sich aus Sicht des Betreibers als anfällig für Ausreißer erweist und einer Maximierung der Wiederverwendungsrate von Ausbauasphalt entgegensteht. Die Kosten für die Umrüstung und den Betrieb stehen in keinem Verhältnis zum Umsatz. Darüber hinaus wird der Nutzen hinsichtlich der Emissionsminderung in Frage gestellt. Grundsätzlich wesentlicher Kritikpunkt ist zudem die stark nachfrageorientierte, diskontinuierliche Fahrweise der AMA's (Schröter, 2018).

Tabelle 14 zeigt eine vom Betreiber zur Verfügung gestellte Kostenübersicht für die Umrüstung und den Betrieb kontinuierlicher Messtechnik an einer AMA.

Tabelle 14: Betriebskosten bei Einsatz kontinuierlicher Emissionsmesstechnik für Gesamtkohlenstoff laut Betreiber (Stand Oktober 2021) (Mitarbeiter:in 2 Unternehmen 1 Asphaltherstellung, Persönliche Mitteilung, 21. April 2021)

Einmalige Kosten	Betrag
Container zur Messung von Druck, Volumenstrom, Temperatur, Analysensystem	115 k€
Emissionsauswerterechner, Schnittstelle Anlagensteuerung, Meeting Point Router (Fern Diagnose)	41 k€
Montage, Container, Containerausstattung, Luftversorgung (separater Kompressor notwendig)	42 k€
Engineering und Systemdokumentation	9 k€
Inbetriebnahme, Training / Schulung	12 k€
Anpassungen Messbühne / Schornstein	25 k€
Summe	244 k €
Fortlaufende Kosten	
Funktionsprüfung, Wartung der Messgeräte, Wartung Kompressor zwei Mal pro Jahr	14 k€
Kalibrierung alle 3 Jahre; hier anteilig auf 1 Jahr	5 k€
Gase	1 k€
Strom (60.000–70.000 kWh/a)	15 k€
Summe	35 k€

Von Verbandsseite werden vor allem technische Gründe angeführt, die gegen einen flächendeckenden Einsatz der kontinuierlichen Messtechnik zur Erfassung von Gesamtkohlenstoff in AMA sprechen (Geschäftsführung Beratungsunternehmen 1. Asphaltherstellung, Persönliche Mitteilung, 24. März 2021). Vor dem Hintergrund der bereits geschilderten behördlichen und betreiberseitigen Stellungnahmen, die den technisch sicheren Betrieb der Technik konstituieren, ist dies nicht nachvollziehbar.

2.10 Potentiale der Emissionsminderung an Asphaltmischanlagen

Potentiale der Emissionsminderung liegen vermutlich vor allem in der Umsetzung der von der TA Luft 2021 geforderten, in Abschnitt 2.8.1 bereits geschilderten Maßnahmen auch für Alt- bzw. Bestandsanlagen. Zudem scheint ein möglichst hoher Anteil an Ausbauasphalt ökonomisch und ökologisch erstrebenswert. Ein Artikel beziffert das CO₂ Einsparpotential mit 10 % bei 17 % und 50 % bei 50 % Recycling-Quote, respektive (Frommel, 2021). Eine andere Quelle gibt ein geringeres Einsparpotential (18 % CO₂ bei 60 % Recyclingmaterial im Mischgut) an (WIRTGEN GROUP, 2022). Gemäß Herstellerangaben sind 90 + X % Recycling-Quote bei Anwendung des Gegenstromverfahrens zur Trocknung technisch möglich (WIRTGEN GROUP, o.D.).

Wesentlich scheint auch die verstärkte Verwendung von Niedertemperaturasphalt (asphaltsuisse, 2023; Hinrichs, 2023; Wirtgen Group [Benninghoven], 2022; Zwingli, 2021). Die Temperaturabsenkung bei der Herstellung beträgt zwischen 20 und 50 °C (asphaltsuisse, 2023; Zwingli, 2021). Daraus folgt eine erhebliche Reduzierung des Energieverbrauchs bei der Herstellung (20 % (Zwingli, 2021)–30 % (Benninghoven, 2022; Zwingli, 2021)), was direkt zu einer Verringerung der entstehenden Treibhausgase führt (asphaltsuisse, 2023; Benninghoven, 2022). Darüber hinaus reduzieren sich bei niedrigeren Einbautemperaturen die Emissionen auf der

Baustelle, was die Arbeitsplatzbelastung der Straßenbauer verringert (asphaltsuisse, 2023; Zwingli, 2021). Der Deutsche Asphaltverband und die darin organisierten Unternehmen haben sich 2023 freiwillig verpflichtet, ab 2023 nur noch temperaturabgesenkten Asphalt herzustellen (Hinrichs, 2023).

Zwei Anbieter von Komplettlösungen (Amman Group, o.D.; Benninghoven, 2009, 2019) für AMA heben weitere Potenziale zur Emissionsminderung hervor, insbesondere durch die indirekte Erwärmung von Ausbauasphalt. Diese Angaben stammen aus Produktbroschüren und Internetauftritten der Firmen und sind nicht unabhängig überprüfbar.

Nach Herstellerangaben lässt sich demnach die größte Reduktion der indirekten CO₂-Emissionen durch möglichst hohe RC-Raten erreichen. Dies gelingt durch den Einsatz von Recyclingtrommeln, bei denen Heißgaserzeuger und Trockentrommel räumlich getrennt sind. Der Ausbauasphalt gelangt am Ende der Trommel hinein und bewegt sich in Richtung der Wärmequelle, wobei er indirekt durch die Heißluft erwärmt wird. Das Gegenstromprinzip erzeugt, wie bereits erwähnt, eine gleichmäßige Temperaturdifferenz und ermöglicht eine langsamere, schonendere Erwärmung. Dadurch wird die Schädigung des Bitumens verringert und die Entstehung organischer Emissionen minimiert. (Amman Group, o.D.; Benninghoven, 2009).

Als weitere Optimierungsmöglichkeiten werden die vertikale Anordnung der Recyclingtrommel direkt über den Mischern (Minimierung der Förderenergie), die aktive Kühlung der Trommel (zur CO-Reduzierung), die Erhöhung der Trocknungseffizienz sowie der kundenseitig gesteuerte Einsatz von Niedrigtemperaturasphalt (Reduzierung des Energiebedarfs) genannt. Das Hauptaugenmerk liegt auf der Reduzierung von CO₂, Gesamtkohlenstoff und NO_x im Verbrennungsprozess sowie auf der Reduzierung des Reststaubes (Amman Group, o.D.). Die Verhältnismäßigkeit und Umsetzbarkeit der Maßnahmen können derzeit nicht beurteilt werden.

2.11 Weiteres Optimierungspotential der Anlagen — Optionen zur Umstellung der Trocknungsverfahren auf treibhausgasneutrale Verfahren

Die Trocknung ist aus thermodynamischen Gründen ein energieaufwändiger Prozess. Es sind verschiedene Bemühungen dokumentiert, die mit der Herstellung verbundenen Emissionen zu minimieren. Mit Verweis auf die explizitere Darstellung der Abschnitte 2.8.1 und 2.10 erfolgt an dieser Stelle nur eine kurze Zusammenfassung der wesentlichen Maßnahmen:

- ▶ Maximierung der Wiederverwertung von Asphalt,
- ▶ feuchtigkeitsgeschützte Lagerung von Gesteinskörnung und Ausbauasphalt,
- ▶ Einsatz von Niedertemperaturasphalt.

Weitere, beworbene oder publizierte Maßnahmen stellen bspw. die Elektrifizierung von Bitumentanks (Benninghoven, 2022) und mobile Mischanlagen an der Baustelle (Verkürzung der Transportwege von Gesteinskörnung und Bitumen) dar (Frommel, 2021; Sutor-Fiedler, 2019). Das Ziel des Forschungsprojekts NOBIT ist die Entwicklung von Bioasphalt, der nahezu vollständig aus aufbereitetem Ausbauasphalt bestehen soll und bei dem ein biologisches Bindemittel, fossiles Bitumen ersetzt. Auch dies soll dem Ziel der Reduzierung des CO₂-Ausstoßes dienen (TU Braunschweig, 2024).

Auch dem Einsatz von Biomasse oder Brennstoffen aus erneuerbaren Rohstoffen wird Potential der Treibhausgasminimierung zugesprochen (Frommel, 2021; Sutor-Fiedler, 2019; Benninghoven, 2022). So bewirbt ein Hersteller eine seiner Brenner-Serien damit, dass diese verflüssigte Biomasse und Holzstaub verbrennen können (Benninghoven, 2022). Das CO₂-Einsparpotential

soll so im Vergleich zu Flüssiggas bei 90 % liegen und lässt sich, bezogen auf den Gesamtprozess, mit 24 % abschätzen (Sutor-Fiedler, 2019).

3 Direkte Trocknung von Grünfutter zur Herstellung von Trockengrün

3.1 Vorwort zur Datenlage bei der Herstellung von Trockengrün

Trockengrün ist getrocknetes Grünfutter, das hauptsächlich aus Gras, Luzerne oder Klee besteht. Konserviert durch Trocknungsprozesse kommt es während der Wintermonate oder in Zeiten geringer Pflanzenproduktion als Futtermittel für Nutztiere zum Einsatz. Der Trocknungsprozess reduziert den Feuchtigkeitsgehalt des Pflanzenmaterials, verringert das Risiko von Schimmelbildung und Verderb, und erhält einen Großteil der Nährstoffe (Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft [LfL], 2012; Geschäftsführung Fachverband A Trockengrünherstellung, Persönliche Mitteilung, 14. Januar 2020). Das einschlägige BVT-Merkblatt der Nahrungsmittel-, Getränke- und Milchindustrie behandelt Trocknungsanlagen zur Grünfuttertrocknung, ohne explizit auf deutsche Standorte einzugehen. In den zugehörigen BVT-Schlussfolgerungen erfolgt die Behandlung im Kapitel „2. BVT-Schlussfolgerungen für Futtermittel“, wobei nur grundlegende Anforderungen formuliert werden. Ausführlichere Regelungen und strengere Anforderungen finden sich in den Verwaltungsvorschriften, der TA Luft 2021 und der NaGeMi-VwV, jeweils unter Nr. 5.4.7.25, wo bei letztgenannte VwV die Regelungen für die Anlagen nochmals konkretisiert. Die Anlagen und Standorte sind den unteren Genehmigungsbehörden bekannt, aber nicht alle mit vertretbarem Aufwand im Rahmen des Forschungsprojektes recherchierbar. Nach Artikel 9 Abs. 2 der Verordnung 183/2005 müssen solche Anlagen registriert oder gemäß Artikel 10 zugelassen sein (Verordnung (EG) 382/2005, 2005). Es existiert keine spezifische VDI-Richtlinie zum Stand der Technik für Trockengrün. Die zugrunde liegenden Daten resultieren weitestgehend aus eigener Recherche (Vögele, 2015; M. Werthmann, Persönliche Mitteilung, 19. Mai 2020) und basieren auf Angaben des Fachverbandes (Geschäftsführung Fachverband A Trockengrünherstellung, Persönliche Mitteilung, 11. Januar 2020; Geschäftsführung Fachverband A Trockengrünherstellung, Persönliche Mitteilung, 14. Januar 2020; Geschäftsführung Fachverband A Trockengrünherstellung, Persönliche Mitteilung, 27. März 2020), dem BVT-Merkblatt für die Lebensmittel-, Getränke- und Milchindustrie (Abschnitt 3) (Santonja et al., 2019), den zugehörigen BVT-Schlussfolgerungen (BVT 16 und 17) (BVT Nahrungsmittel-, Getränke- und Milchindustrie, 2019), der verschiedenen Publikation der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft wie bspw. „Kleegrass, Heu, Cobs, Luzerne 2018“ (LfL, 2018) sowie privaten Konsultationen mit Experten (Geschäftsführung Unternehmen 1. Trockengrünherstellung, Persönliche Mitteilung, 20. November 2020; Qualitätstrocknung Nordbayern eG, o.D.; H. Schenkel, Persönliche Mitteilung, 19. März 2020; H. Schenkel, Persönliche Mitteilung, 20. März 2020).

3.2 Rechtliche und normative Grundlagen der Trockengrünherstellung

Futtermittel umfassen alle Stoffe und Erzeugnisse, die zur oralen Verfütterung an Tiere bestimmt sind. Herstellung, Vermarktung, Lagerung, Beförderung und Verwendung von Futtermitteln wie Trockengrün und auch Zuckerrübenschnitzel sind in der EU detailliert geregelt. Im Jahr 2005 erfolgte die Verabschiedung des Lebensmittel- und Futtermittelgesetzbuchs (LFGB, 2013), welches das Futtermittelgesetz aufhob und der Umsetzung des EU-Futtermittelrechts dient. Auf diesem Gesetzbuch gründen weiterführende Verordnungen wie vor allem die Futtermittelverordnung (FuttMV, 1981/2016). Beide bestimmen außerdem Zuständigkeiten, über das EU-Recht hinausgehende Details etwa zur Zulassung, Registrierung, Überwachung und Versicherung (§ 17a LFGB, 2013) bestimmter Futtermittelunternehmen und die Bestrafung von Verstößen gegen futtermittelrechtliche Normen. Spezifische Grenzwerte für Anlagen sowie Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz und Minderung der Geruchsbelastung legen die TA Luft 2021 (TA

Luft, 2021) und, über deren Umfang hinausgehend, die Allgemeine Verwaltungsvorschrift Na-GeMi-VwV 2023 (NaGeMi-VwV, 2024) im nationalen Recht fest. Die folgende Tabelle 15 fasst wesentliche rechtliche und normative Grundlagen der Trockengrünherstellung zusammen:

Tabelle 15: Rechtliche und normative Grundlagen für die Grünfütterttrocknung

Norm / Richtlinie	Inhalt
Verordnung (EG) Nr. 183/2005 (Verordnung (EG) 183/2005, 2005)	Umfassender rechtlicher Rahmen, legt Hygienevorschriften, Rückverfolgbarkeit, Registrierung und Qualitätskontrolle regelt und die Verantwortung der Hersteller für die Sicherheit ihrer Produkte
Verordnung (EG) Nr. 767/2009 (Verordnung (EG) 767/2009, 2009)	Regelt das Inverkehrbringen und die Verwendung von Futtermitteln und enthält Anforderungen an die Kennzeichnung und Sicherheit von Futtermitteln
Verordnung (EU) Nr. 68/2013 (Verordnung (EU) 68/2013, 2013)	enthält einen Katalog der Einzelfuttermittel und stellt sicher, dass Futtermittel sicher und korrekt gekennzeichnet sind.
Durchführungsbeschluss 2019/2031(BVT Nahrungsmittel-, Getränke- und Milchindustrie, 2019)	Schlussfolgerungen zu den besten verfügbaren Techniken (BVT) für die Nahrungsmittel-, Getränke- und Milchindustrie (BVT 16 und BVT 17)
Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG, 1974/2013)	Nationaler rechtlicher Rahmen für Emissionsschutz.
Verordnung über genehmigungsbedürftige Anlagen (4. BImSchV, 2017)	Es besteht Genehmigungs- und Überwachungspflicht gemäß Nr. 7.25 des Anhangs 1.
Lebensmittel- und Futtermittelgesetzbuch (LFGB, 2013)	Nationaler rechtlicher Rahmen für Lebensmittel- und Futtermittelsicherheit. Allgemeine Grundlagen für die Herstellung und Verarbeitung von Futtermittel (§ 31–Übergang von Stoffen auf Lebensmittel), keine Emissionsgrenzwerte.
TA Luft 2021 (TA Luft, 2021)	Setzt BVT-Schlussfolgerungen in nationales Recht um. Neben allgemeinen Anforderungen (bspw. Abschnitt 5.25) ist speziell Abschnitt 5.4.7.25 (Anlagen der Nummer 7.25 4. BImSchV) zu beachten.
Futtermittelverordnung (FuttMV, 1981/2016)	Die FuttMV bildet zusammen mit Teilen des höherrangigen LFGB den Kern des deutschen Futtermittelrechts, erfasst Trocknungsanlagen durch § 17 (Zulassungspflicht, § 19 (Besondere Pflichten) und Anlage 4 (Anforderungen und Pflichten für Betriebe gemäß § 17 Absatz 2), enthält aber keine Grenzwerte.
Allgemeine Verwaltungsvorschrift (NaGeMi-VwV, 2024)	Die NaGeMi-VwV fordert oder regelt die Reduzierung von Emissionen und Umweltauswirkungen in der Nahrungsmittel-, Getränke- und Milchindustrie, indem sie spezifische Grenzwerte und Maßnahmen zur Energieeffizienz vorschreibt.

Ergänzend zu den rechtlichen Anforderungen nutzen die bekannten Trocknungsanlagen als Maßnahme zur Qualitätssicherung Prüfsysteme wie die QS-Zertifizierung oder gleichartige Zertifizierungssysteme. Die Unterlagen dieser freiwilligen Maßnahme enthalten neben allgemeinen Vorgaben (QS Qualität und Sicherheit GmbH, 2020b) wie Futtermittelmonitoring und Kontrollrhythmus auch Höchstgehalte von Schadstoffen, wie z.B. PAK (QS Qualität und Sicherheit GmbH, 2020a), die sich während der Trocknung bilden können, und sind indirekt relevant für die Betriebsweise der Anlagen.

3.3 Grundsätzliche Einordnung des Anwendungsgebietes Trockengrünherstellung sowie der darin angewandten Trocknung

Bei der Herstellung von Trockengrün werden Grünpflanzen durch Heißlufttrocknung konserviert (Geschäftsführung Fachverband A Trockengrünherstellung, Persönliche Mitteilung, 11. Januar 2020; Hecht, 2003). Bei den Grünpflanzen handelt es sich vorwiegend um frisch gemähte, junge Pflanzen wie Gras, Klee oder Luzerne, die zunächst leicht vorgetrocknet („angewelkt“) und zerkleinert werden (Geschäftsführung Fachverband A Trockengrünherstellung, Persönliche Mitteilung, 11. Januar 2020; Hecht, 2003). Ziel der Trocknung an sich ist es, das Wiesengras zu konservieren und dabei Nährstoffverluste zu minimieren (Geschäftsführung Fachverband A Trockengrünherstellung, Persönliche Mitteilung, 11. Januar 2020).

In Deutschland existieren laut Bundesfachverband Landwirtschaftlicher Trocknungswerke Deutschland e.V. (BLTD) 32 Trocknungsunternehmen mit insg. 37 Trocknungsstandorte (Geschäftsführung Fachverband A Trockengrünherstellung, Persönliche Mitteilung, 11. Januar 2020), vorwiegend organisiert als Genossenschaften. Die Trocknungsanlagen erhalten Gras und Luzerne von Landwirten aus einem Umkreis von etwa 80 Kilometern und verarbeiten diese zu haltbarem Futter, das für die Tierfütterung besser geeignet ist. Dadurch entsteht in Zusammenarbeit mit den Landwirten ein jährlicher Branchenumsatz von über 130 Millionen Euro. Das Futter wird in der Region produziert und genutzt, wodurch die Wertschöpfung lokal bleibt (Geschäftsführung Fachverband A Trockengrünherstellung, Persönliche Mitteilung, 11. Januar 2020).

So produziert das Trockenwerk Eldena beispielsweise jährlich zwischen 12.000 und 18.000 Tonnen Trockengrün, wobei die Menge von der Wetterlage abhängt (Bresegarder Agro Service & Handels GmbH, 2024). Laut BLTD erreichte die Produktionsmenge der Trocknungsbranche aufgrund der Wetterbedingungen etwa 2,3 Millionen Dezitonnen (Geschäftsführung Fachverband A Trockengrünherstellung, Persönliche Mitteilung, 11. Januar 2020). Die anhaltende Dürre von Frühjahr bis Herbst 2018 führte dazu, dass die Grünschnitterträge unter dem langjährigen Durchschnitt lagen (Geschäftsführung Fachverband A Trockengrünherstellung, Persönliche Mitteilung, 11. Januar 2020). Abhängig von der Witterung produziert die Trocknungsbranche jährlich zwischen 2,4 und 2,8 Millionen Dezitonnen getrockneter Güter (Geschäftsführung Fachverband A Trockengrünherstellung, Persönliche Mitteilung, 11. Januar 2020).

3.4 Beschreibung des Einsatzstoffes Grünfutter

Zur Verwendung kommen im Wesentlichen Wiesengras sowie kleinkörnige Leguminosen wie Klee und Luzerne. Weniger häufig werden laut BLTD auch Körnermais, Raps und Getreide getrocknet. Laut dem Deutscher Raiffeisenverband e.V. (Mitarbeiter:in 1 Fachverband A Getreidewirtschaft, Persönliche Mitteilung, 10. November 2020) und dem Verband der Getreide-, Mühlen- und Stärkewirtschaft spielen Direkttrocknungsanlagen (Mitarbeiter:in 1 "Fachverband B Getreidewirtschaft, Persönliche Mitteilung, 16. Oktober 2020) für Getreide eine untergeordnete Rolle.

Nach der Mahd oder Ernte und kurzer Anwelkzeit findet in der Futtertrocknungsanlage die eigentliche Trocknung statt. Aufgrund der raschen Konservierung sind die Nährstoffverluste gering, die bei Kohlenhydraten und Rohprotein bei 5–10 % liegen (LfL, 2012; Geschäftsführung Fachverband A Trockengrünherstellung, Persönliche Mitteilung, 11. Januar 2020). Die relativ hohen Trocknungskosten rechtfertigen nur die Verwendung von hochwertigem Ausgangsmaterial (LfL, 2012).

3.5 Grundlegender Verfahrensablauf des Prozesses und der Trocknung von Grünfutter

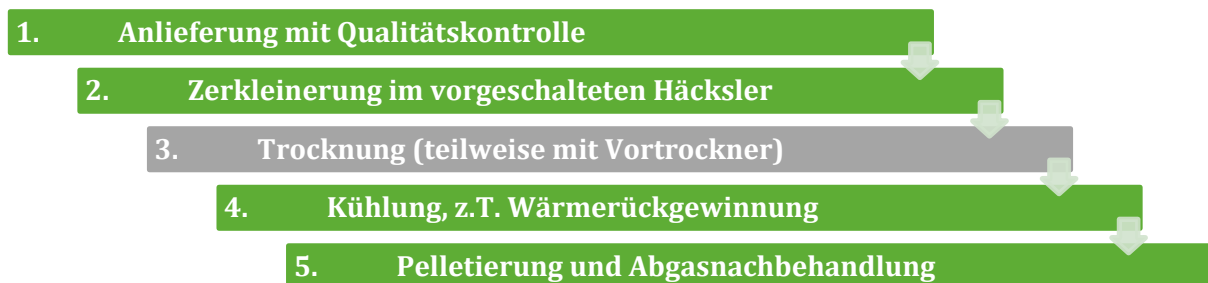
Die Trockengrünherstellung beginnt mit der Ernte von frisch gemähten jungen Pflanzen wie Gras, Klee oder Luzerne. Mitunter wird das geschnittene Grünfutter auf dem Feld oder Hof der Trocknung leicht vorgetrocknet, um den Feuchtigkeitsgehalt zu reduzieren. Dieses Anwelken reduziert somit den nötigen Energieeinsatz und erhöht die Effizienz des anschließenden Trocknungsprozesses (Geschäftsführung Fachverband A Trockengrünherstellung, Persönliche Mitteilung, 11. Januar 2020).

Die Trocknungswerke zerkleinern das Grünfutter zunächst mechanisch mittels Häcksler. Das Zerkleinern vergrößert die Oberfläche des Materials, was die Trocknung verkürzt. Dem schließt sich die eigentliche Heißlufttrocknung in Trommeltrocknern mit direkter Befeuerung an. Bei Temperaturen über 300 °C wird dem zerkleinerten Grünfutter bis zum Erreichen des gewünschten Restfeuchtigkeitsgehalt Wasser entzogen (Geschäftsführung Fachverband A Trockengrünherstellung, Persönliche Mitteilung, 11. Januar 2020).

Der Trocknung schließt sich die Kühlung des Materials an, um die Qualität zu erhalten und Schimmelbildung zu verhindern. Das abgekühlte Trockengrün wird anschließend zu Pellets (Cobs) oder Ballen gepresst, was den Transport und die Handhabung erleichtert. Das fertige Trockengrün wird anschließend an die Landwirte zurückgeliefert oder als Futter verkauft (Geschäftsführung Fachverband A Trockengrünherstellung, Persönliche Mitteilung, 11. Januar 2020).

Im Wesentlichen besteht die Herstellung von Trockengrün den in Abbildung 8 dargestellten Arbeitsschritten:

Abbildung 8: Prinzipielle Arbeitsschritte bei der Herstellung von Trockengrün



Quelle: eigene Darstellung, DBI-Gruppe 2022

Die Trocknung von Grünfutter bietet gemäß BLTD (Geschäftsführung Fachverband A Trockengrünherstellung, Persönliche Mitteilung, 11. Januar 2020), aber auch anderen Quellen (ATRO GmbH, 2024), Vorteile, welche im Folgenden zusammenfasst sind:

Vorteile der Trocknung von Grünfutter

Erhaltung von Nährstoffen: Die Heißlufttrocknung entzieht dem Gras schonend Wasser und konserviert dabei wichtige Mineralien und Nährstoffe langfristig, steigert den Gehalt des Undegradable Dietary Proteins (UDP).

Hoher Verwertungsgrad: Trockengrün weist einen Verwertungsgrad von über 92 % auf, während bei der Feldtrocknung 20-30 % und bei der Silierung etwa 15 % der Trockenmasse verloren gehen.

Verbesserte Eiweißnutzung: Die thermische Behandlung macht das Eiweiß pansenstabil, was die Verfügbarkeit im Dünndarm der Wiederkäuer erhöht und somit die Proteinaufnahme verbessert.

Konservierung von Vitaminen: Vitamine wie β -Carotin bleiben im Trockengrün erhalten, was wichtig für die Gesundheit und Leistung der Tiere ist.

Hohe Schmackhaftigkeit: Der natürliche Zuckergehalt bleibt erhalten, was die Futterraufnahme und somit die Milchproduktion fördert.

Regionale Unterstützung: Die Produktion von Trockengrün fördert die lokale Wirtschaft, indem sie von regionalen Landwirten stammt und die Wertschöpfung in der Region bleibt.

UDP gilt als pansenstabil und als besser für Rinder verwertbar, da es den Magen der Kuh im Gegensatz zu normalem Protein unbeschadet passiert. Normales, im Futtermittel enthaltenes Protein ist für Hochleistungskühe nicht ausreichend, sodass zusätzlich gefüttert wird. Der BLTD hebt in seiner Stellungnahme auch den hohen Gehalt an Vitaminen, insbesondere Betacarotin, hervor (Geschäftsführung Fachverband A Trockengrünherstellung, Persönliche Mitteilung, 11. Januar 2020). Futtermittel mit hohem Betacarotin-Gehalt sind für Biobetriebe wertvoll, da sie zur Einstellung der Dotterfarbe der Produkte beitragen (H. Schenkel, Persönliche Mitteilung, 19. März 2020).

Den oben aufgezeigten Vorteilen stehen zu berücksichtigende Nachteile gegenüber, u.a. der hohe Energieeinsatz des Trocknungsprozesses, welcher mit zusätzlichen CO_2 -Emissionen einhergeht. Ferner ist bei unsachgemäßer Fahrweise und bei Einsatz von festen Brennstoffen oder schwerem Heizöl ein Schadstoffeintrag von Dioxinen und polycyclischen aromatischen Kohlenwasserstoffen möglich (Hecht, 2003). Einige Nachteile sind im Folgenden zusammengefasst:

Nachteile der Trocknung von Grünfutter

Brennstoffeinsatz bedingt extra CO_2 -Emissionen: Die Trocknung erfordert erhebliche Mengen an Energie, meist aus fossilen Brennstoffen, was zusätzliche CO_2 -Emissionen verursacht.

Möglicher Schadstoffeintrag ins Futtermittel: Bei unsachgemäßer Fahrweise und bei Einsatz von festen Brennstoffen oder schwerem Heizöl ist ein Schadstoffeintrag von Dioxinen und polycyclischen aromatischen Kohlenwasserstoffen möglich.

Zusätzliche, zu wartende Anlagentechnik: Die spezialisierte Trocknungsanlage erfordert regelmäßige Wartung und erhöht die Betriebskosten.

Vergleichsweise teure Aufbereitung: Hohe Energiekosten und Investitionen in Anlagentechnik machen Trockengrün teurer als andere Futtermittel.

Momentan schwieriger Absatzmarkt: Schwankende Nachfrage und Konkurrenz durch günstigere Alternativen erschweren den Verkauf von Trockengrün

Zudem verursachen der hohe Energieeinsatz sowie die zusätzliche und regelmäßig zu wartende Anlagentechnik Kosten. Direkte Belege für höhere Kosten finden sich in den gegebenen Quellen nicht. Allerdings lässt der von Bresegarder Agro (2024) und Hecht (2003) beschriebene aufwendige Prozess auf höhere Kosten schließen.

3.6 Die Trockner der Grünfüttertrocknung im Detail

3.6.1 Trocknertypen und deren Leistungsdaten bei der Trockengrünherstellung

Gemäß dem BLTD, der nach eigenen Angaben alle 31 Grünfütter-Trocknungsanlagen in Deutschland vertritt, kommen zur Trocknung von Grünfütter ausschließlich Trommeltrockner mit Direktbefeuerung zum Einsatz. Über deren konstruktive Ausführung ist lediglich bekannt, dass die bereits erwähnten zur Abfallaufbereitung eingesetzten Trockner darauf basieren. Effizienzbedingt ist die Nutzung von mehrzügigen Trommeltrocknern anzunehmen, welche eine vergleichbare Baugröße aufweisen. Für zwei Standorte ist letzteres auch belegt (Geschäftsführung Unternehmen 1. Trockengrünherstellung, Persönliche Mitteilung, 20. November 2020; Trocknungswerk Donauaalthem GmbH, 2024). Diese Technologie zeichnet sich laut BLTD durch eine schnelle und effektive Trocknung und hohe Energieeffizienz aus. Darüber hinaus erfordert sie geringe Wartungsarbeiten (Geschäftsführung Fachverband A Trockengrünherstellung, Persönliche Mitteilung, 11. Januar 2020; Geschäftsführung Fachverband A Trockengrünherstellung, Persönliche Mitteilung, 27. März 2020).

Die Temperaturen des Heißgases am Trocknereintritt liegen oberhalb von 400 °C (Geschäftsführung Fachverband A Trockengrünherstellung, Persönliche Mitteilung, 11. Januar 2020), typisch sind 500–600 °C (Köhler et al., 2018; Qualitätstrocknung Nordbayern eG, o.D.; Trocknungswerk Donauaalthem GmbH, 2024). Die resultierenden Abgastemperaturen liegen zwischen 80 und 140 °C (Geschäftsführung Fachverband A Trockengrünherstellung, Persönliche Mitteilung, 11. Januar 2020). Aufgrund der angegebenen Abgastemperaturen und basierend auf der Notwendigkeit, die Effizienz der Trocknung zu maximieren und gleichzeitig die Qualität des Futters zu erhalten, lässt sich schließen, dass sich das Trockengut während des Trocknungsprozesses auf etwa 60 bis 70 °C erwärmt.

Die Anlagen sind in der Lage, 5 bis 15 Tonnen Wasser pro Stunde zu verdampfen, erreichen so je nach Anlagengröße eine Durchsatzkapazität von 25.000 bis 150.000 Dezitonnen pro Jahr (Geschäftsführung Fachverband A Trockengrünherstellung, Persönliche Mitteilung, 11. Januar 2020). Die Gesamtproduktion ist, wie bereits erwähnt, witterungsabhängig. Zur Trocknung sind 5 bis 20 Megawatt thermische Leistung der Feuerungsanlagen nötig (Geschäftsführung Fachverband A Trockengrünherstellung, Persönliche Mitteilung, 11. Januar 2020; Qualitätstrocknung Nordbayern eG, o.D.). Da das Trockengut nur in der Wachstumsphase der Pflanzen zur Verfügung steht, arbeiten die Anlagen saisonal, werden hauptsächlich in den Monaten April bis Oktober/November betrieben (Geschäftsführung Fachverband A Trockengrünherstellung, Persönliche Mitteilung, 11. Januar 2020).

Das durchschnittliche Alter der Trocknungsstandort liegt laut BLTD bei 44 Jahren (Geschäftsführung Fachverband A Trockengrünherstellung, Persönliche Mitteilung, 27. März 2020). Daraus lassen sich aber nur bedingt Rückschlüsse auf die Trocknungsanlagen ziehen. Es ist davon auszugehen, dass die Anlagen regelmäßig gewartet und defekte Maschinenteile gewechselt werden.

Vereinzelt kommen Bandtrockner zur Vortrocknung des Grünguts zum Einsatz (Geschäftsführung Unternehmen 1. Trockengrünherstellung, Persönliche Mitteilung, 20. November 2020). Deren Trocknereintrittstemperatur liegt deutlich unter der der Trommeltrockner, wird bspw. für eine Trockenanlage mit 105 °C abgegeben (Köhler et al., 2018). Diese schonende Vortrocknung des Trockenguts ist möglich, wo entsprechende (Ab-) Wärmequellen, bspw. ein Biomasseheizkraftwerk (Köhler et al., 2018), zur Verfügung stehen.

3.6.2 Brennstoffeinsatz und Feuerungsanlagen der Trockengrünherstellung

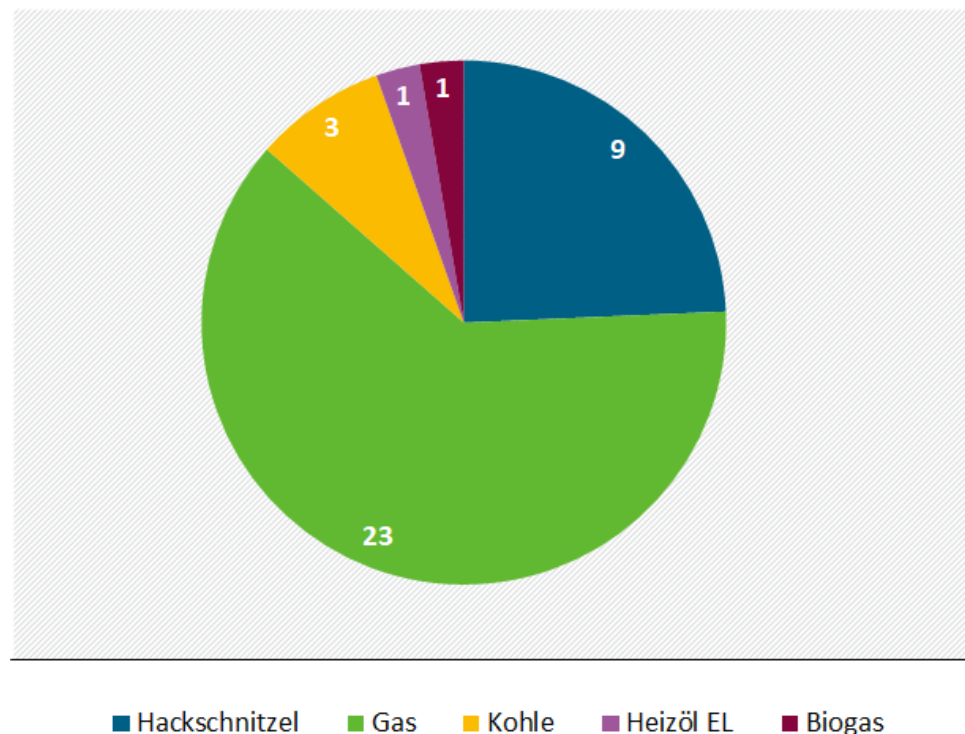
Die zur Trocknung benötigte, thermische Leistung variiert, liegt gemäß BLTD je nach Anlagengröße zwischen 5–20 MW (Geschäftsführung Fachverband A Trockengrünherstellung, Persönliche Mitteilung, 11. Januar 2020; Geschäftsführung Unternehmen 1. Trockengrünherstellung, Persönliche Mitteilung, 20. November 2020; Köhler et al., 2018). Alle Standorte führen eine Teil des Trocknerabgases (Brüdenrückführung) zum Heißgaserzeuger zurück, um damit die Verbrennungsluft vorzuwärmen (Geschäftsführung Fachverband A Trockengrünherstellung, Persönliche Mitteilung, 11. Januar 2020). Diese allgemein bekannte Maßnahme mindert den nötigen Energieeinsatz und steigert die Energieeffizienz der Anlagen, wobei nur in einem Fall Angaben zum Volumenanteil (30 Volumenprozent, (Geschäftsführung Unternehmen 1. Trockengrünherstellung, Persönliche Mitteilung, 20. November 2020)) vorliegen. Es kommt dabei auch zu einer Aufkonzentration der Schadstoffe im Abgas.

Die Befeuerung der Anlagen (siehe Abbildung 9) erfolgte 2021 nach Angaben des Fachverbandes zum Großteil mit Erdgasbrennern. Bei knapp einem Viertel der Anlagen kommen naturbelassene Holzhackschnitzel in Kesseln zum Einsatz. Für 3 Anlagen ist der Einsatz von Kohlestaub ausgewiesen, wobei für eine dieser Anlagen die Umstellung auf Holzhackschnitzel geplant ist. Jeweils 1 Anlage erzeugt das heiße Trocknungsgas mit Biogas respektive Heizöl EL. Eine Anlage stellt innerhalb der Projektlaufzeit den Betrieb ein (Geschäftsführung Fachverband A Trockengrünherstellung, Persönliche Mitteilung, 11. Januar 2020).

Abbildung 9: Verteilung der Brennstoffe zur Erzeugung von Heißgas für die Trocknung von Trockengrün

Brennstoffe bei der Trockengrünherstellung

(Abfrage 2021)



Quelle: eigene Darstellung, DBI-Gruppe, basierend auf Befragung BLTD (Geschäftsführung Fachverband A Trockengrünherstellung, Persönliche Mitteilung, 11. Januar 2020)

3.6.3 Beschreibung von Anlagen zur Trockengrünherstellung, die dem Stand der Technik entsprechen

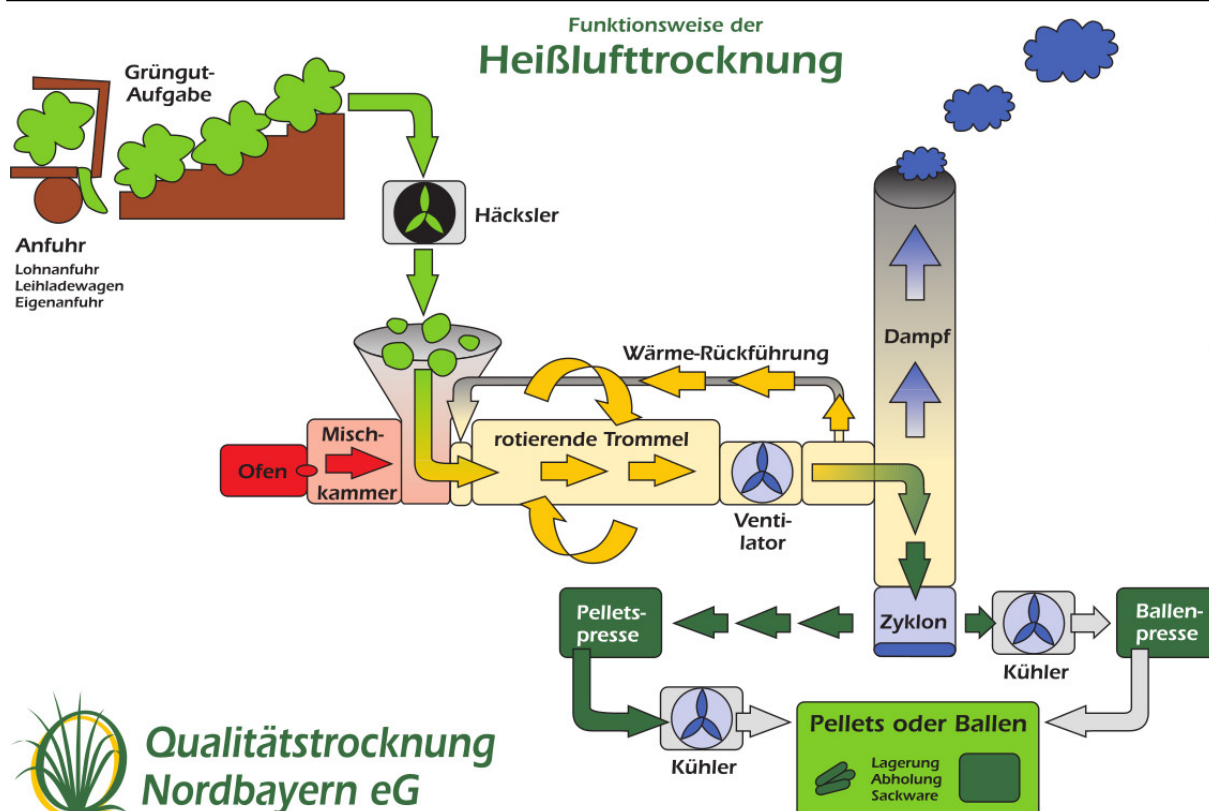
Alle Betreiber der in Tabelle 16 genannten Unternehmen sowie vier weitere Unternehmen wurden mehrfach kontaktiert. Zum Stand der Erstellung dieses Berichtsteils liegt die Rückmeldung eines Unternehmens vor.

Tabelle 16: Betreiber von Trocknungsanlagen, welche dem Stand der Technik entsprechen (Verbandsangaben (Geschäftsführung Fachverband A Trockengrünherstellung, Persönliche Mitteilung, 27. März 2020))

Trocknungsunternehmen	Standort	Brennstoff
Qualitätstrocknung Nordbayern e.G. (QTN)	Gunzenhausen	Erdgas
RegioGras eG	Hergatz	Erdgas
Futtermitteltrocknung Altusried eG	Altusried	Hackschnitzel

Beschreibung QTN-Trocknungsanlage am Standort Gunzenhausen: Die Anlage arbeitet nach den bereits erwähnten Verfahrensschritten (Zerkleinern - Trocknen - Kühlen - Pressen - Lagern) – die Funktionsweise der Anlage ist zudem in Abbildung 10 dargestellt. Die Genehmigung der Anlage erfolgte nach der 4. BImSchV Anhang I Nr. 7.25.2. Das Trocknungsgut stellen Grünfütter (Gras, Luzerne), Mais und Traubentrestler dar.

Abbildung 10: Verfahrensablauf bei der Heißlufttrocknung von Trockengrün



Quelle: © www.werbegrafik-schule.de. Uneingeschränkte Nutzungsrechte: Qualitätstrocknung Nordbayern eG. (Geschäftsführung Unternehmen 1. Trockengrünherstellung, Persönliche Mitteilung, 20. November 2020)

Am Standort kommt ein dreizügiger, direkt beheizter Drehrohtrockner zum Einsatz. Das Rauchgas tritt mit 570–600 °C in den Trockner ein, durchströmt ihn vollständig und wird dann mit

dem Trockengut vom Trocknerende zurück in Richtung Trocknereintritt geführt. Dort wird es nochmals umgelenkt und verlässt den Trockner am Ende des dritten Zuges mit etwa 100 °C. Das Trockengut selbst erreicht deutlich niedrigere Temperaturen. (Geschäftsführung Unternehmen 1. Trockengrünherstellung, Persönliche Mitteilung, 20. November 2020)

Der durchschnittliche, jährliche Durchsatz des Standortes liegt bei etwa 7.500 Tonnen. Die Erst-inbetriebnahme fand im Jahr 1997 statt. Die letzte Erneuerung datiert auf das Jahr 2019. Die Führungsgröße des Trocknungsprozesses stellt mittelbar die Ausgangsfeuchte des Trockenguts dar, unmittelbar geregelt wird aber über die Abgastemperatur (Geschäftsführung Unternehmen 1. Trockengrünherstellung, Persönliche Mitteilung, 20. November 2020).

Die Feuerungsanlage (1 Hauptbrenner) hat eine thermische Leistung von 13,1 Megawatt, wobei das Trockengut nicht direkt in Kontakt mit der Flamme tritt. Als Brennstoff fungiert an dieser Anlage Erdgas (Geschäftsführung Unternehmen 1. Trockengrünherstellung, Persönliche Mitteilung, 20. November 2020). 70 Volumenprozent der Abgase (Brüden) werden über den Schornstein abgeleitet, während 30 Volumenprozent zur Wärmerückgewinnung genutzt werden. Tabelle 17 fasst das Beschriebene kurz zusammen:

Tabelle 17: Technische Parameter eines Trocknungswerkes, welches nach Verbandsangaben dem Stand der Technik entspricht (Geschäftsführung Unternehmen 1. Trockengrünherstellung, Persönliche Mitteilung, 20. November 2020)

Parameter / Anlagengruppe	Wert
Trockner	
Bauart	Drehrohtrockentrommel in Dreizugbauweise, direktbeheizt
Durchsatz (pro d/a)	ca. 7.500 t/a
Erstinbetriebnahme	1997 (grundlegend erneuert 2019)
Führungsgröße	mittelbar: Ausgangsfeuchte; unmittelbar: Abgastemperatur
Abgas-Eintritts-/Austrittstemperatur	Eintritt: max. 600 °C; Austritt: ca. 100 °C
Feuerungsanlage	
Gesamtleistung Hauptbrenner (MW)	13,1 MW
Gesamtanzahl Hauptbrenner	1
Brennstoff	Erdgas
Flammenkontakt mit Trockengut	kein Flammenkontakt
Sonstiges	
Abgasführung	70/30 Volumenprozent Schornstein/Wärmerückgewinnung
Wärmerückgewinnung	"Brüden"-Rückführung ca. 30 Volumenprozent von Prozesswärme

3.7 Abgasvolumenströme, Abgasleitung und Abgasnachbehandlung der Trockengrüntrockner

Es liegen nur wenige Informationen zu den Abgasvolumenströmen und der Abgasmatrix vor. Die Abgasbehandlung besteht gemäß Verbandsangaben aus der (teilweisen) Kombination von Abgasrückführung beziehungsweise Brüdenrückführung und Wäschern, Schlauchfiltern sowie

(Multi-) Zyklonen (Geschäftsführung Fachverband A Trockengrünherstellung, Persönliche Mitteilung, 11. Januar 2020). Den Autoren der Studie ist keine Anlage mit einem Wäscher bekannt. Darüber hinaus sind wegen der Brandgefahr ausgehend von glühenden Aschebestandteilen Schlauchfilter nur bei entsprechendem aschefreiem Brennstoff zu erwarten.

3.7.1 Gesetzliche Forderungen an die Emissionsüberwachung der Trockengrünherstellung

Die gesetzlichen Grundlagen für die Emissionsüberwachung stützen sich hauptsächlich auf den Durchführungsbeschluss 2019/2031 der Europäischen Kommission für die Lebensmittel-, Getränke (BVT Nahrungsmittel-, Getränke- und Milchindustrie, 2019) und Milchindustrie, den Vorgaben der TA Luft 2021 (TA Luft, 2021) sowie der allgemeinen Verwaltungsvorschrift (NaGeMi-VwV, 2024). Nachfolgend eine kurze Zusammenfassung der Bestimmungen.

Analog den Durchführungsbeschlüssen zu den besten, verfügbaren Techniken anderer Sektoren fordert die BVT Nahrungsmittel-, Getränke- und Milchindustrie (2019), welche bestimmte Futtermittel mit erfasst, allgemeine Anforderungen zur Emissionsüberwachung, Steigerung der Energieeffizienz und Ressourceneffizienz der Anlagen. Spezifisch auf die Verarbeitung von Grünfutter geht die BVT an folgenden Stellen ein:

- ▶ BVT 5. Zur Überwachung gefasster Emissionen in die Luft,
- ▶ BVT 6 Zur Steigerung der Energieeffizienz (indirekt über BVT 16),
- ▶ BVT 16. Zur Steigerung der Energieeffizienz bei der Verarbeitung von Grünfutter,
- ▶ BVT 17. Zur Verringerung gefasster Staubemissionen in die Luft.

Konkret sind nach BVT 5 vierteljährlich bei der Trocknung von Grünfutter in Verbindung mit BVT 16 die gefassten Staubemissionen zu erfassen, wobei BVT 17 die Anwendung von Gewebefilter oder Zyklonen zur Verringerung letztgenannter Emissionen vorschreibt (BVT Nahrungsmittel-, Getränke- und Milchindustrie, 2019). BVT 5 und BVT 6 stehen im Zusammenhang mit der Steigerung der Energieeffizienz der Anlagen. Neben der allgemeinen Forderung der Anwendung eines Energieeffizienzplans (BVT 6a) fordert BVT 16 (ggf. in Kombination) die Verwendung von vorgetrocknetem Futter (Anwelken), die Rezirkulation von Abgasen (Brüdenrückführung) sowie Verwendung von Abwärme für die Vortrocknung. BVT-assoziierte Grenzwerte enthält für die Herstellung von Trockengrün enthält dieser Durchführungsbeschluss allerdings nicht.

Die TA Luft 2021 und NaGeMi-VwV hingegen fordern gleichlautend konkret, dass staubförmige Emissionen, angegeben als Gesamtstaub, die Massenkonzentration $60 \text{ mg/m}^3 \text{ (f)}$ nicht überschreiten. Für Altanlagen gelten abweichend davon 75 mg/m^3 , jeweils bezogen auf das feuchte Abgas. Ferner enthalten die TA Luft als auch die NaGeMi - VwV Vorgaben für die spezifischen Emissionen an organischen Stoffen. Tabelle 18 fasst diese zusammen:

Tabelle 18: Emissionsbegrenzungen nach TA Luft 2021 und NaGeMi-VwV für Anlagen zur Trocknung von Grünfutter(NaGeMi-VwV, 2024; TA Luft, 2021)

Emission	Grenzwert TA Luft	NaGeMi - VwV
Staubförmige Emissionen, angegeben als Gesamtstaub	$60 \text{ mg/m}^3 \text{ (f)}$	$60 \text{ mg/m}^3 \text{ (f)}$
Organische Stoffe, angegeben als Gesamtkohlenstoff	0,25 kg je Mg Wasserverdampfung	0,25 kg je Mg Wasserverdampfung

Emission	Grenzwert TA Luft	NaGeMi - VwV
Formaldehyd, Acetaldehyd, Acrolein und Furfural in der Summe	0,10 kg je Mg Wasserverdampfung	0,10 kg je Mg Wasserverdampfung
Staubförmige Emissionen, angegeben als Gesamtstaub	75 mg/m ³ (f) (Altanlagen)	75 mg/m ³ (f) (Altanlagen)

Anzumerken ist ferner, dass Verwaltungsvorschriften fordern, dass die Möglichkeit zur Errichtung von Anlagen mit mindestens einer Stufe nach der Technik der Indirekttrocknung zu prüfen ist. Auch sind die Trockner so zu betreiben, dass der Betriebsleitwert für CO nicht überschritten wird. Die maximale Massekonzentration von CO im Abgas ist zudem so festzulegen, dass die Forderungen an die maximale Konzentration an organischen Stoffen erfüllt wird (NaGeMi-VwV, 2024; TA Luft, 2021).

Prinzipiell führt der Fachverband aus, dass „So gut wie alle Trocknungen QS zertifiziert sind“ (Geschäftsführung Fachverband A Trockengrünherstellung, Persönliche Mitteilung, 11. Januar 2020). Die rechtlich nicht geforderte QS-Zertifizierung gibt strenge Vorgaben zu den jeweiligen Prüfparameter vor, die bei einer Direkttrocknung im Trommeltrockner relevant sein können (Dioxin, PAK, etc.). Emissionsüberwachung bzw. Grenzwerte von PAK (Polycyclische Aromatische Kohlenwasserstoffe) sind ansonsten im deutschen Recht nicht explizit geregelt (H. Schenkel, Persönliche Mitteilung, 19. März 2020).

3.7.2 Abgaskomponenten des Abgases hinter Trocknern der Trockengrünherstellung

Die Abgasmatrix besteht im Wesentlichen aus Wasserdampf, Kohlendioxid, Stickoxiden, Kohlenmonoxid und Staub sowie organischen Komponenten. Im Laufe des Forschungsprojektes konnten keine dedizierten Massekonzentrationen deutscher Anlagen recherchiert werden. Dies liegt vermutlich daran, dass es bis zur Novellierung der TA Luft keine derartigen, gesetzlichen Forderungen an die Anlagenbetreiber gab. So verwundert es nicht, dass auch das BVT-Merkblatt, Grundlage der BVT-Schlussfolgerungen, keine Emissionswerte derartiger, deutscher Anlagen enthält. Wiedergegeben werden lediglich die Staubemissionen von drei französischen Standorten, deren Emissionen hier zur groben Orientierung dienen sollen. Tabelle 19 listet die Daten:

Tabelle 19: Staubemissionen dreier französischer Standorte zur Herstellung von Trockengrün(Santonja et al., 2019)

Installations-ID	Staub	O ₂ -Gehalt	Abgasreinigung
	Mittelwert (mg/Nm ³)	Mittelwert (Volumenprozent)	
264-1	151,02	17,5	Zyklon(e)
265-1	184,25	16,4	Zyklon(e)
292-1	116,25	17,45	Zyklon(e) + Nasswäscher

Anzumerken ist, dass es sich um auf das trockene Abgas bezogene Emissionswerte handelt. Die für die Vergleichbarkeit sinnvolle Korrektur eines Abgases um den Dampfgehalt erhöht im Allgemeinen die Emissionswerte, was auch im Vergleich mit den in Tabelle 18 gelisteten Grenzwerte zu beachten ist. Das BVT-Merkblatt enthält auch Informationen zur eingesetzten Abgasreinigung an den Standorten. Interessant ist, dass Standort 292-1 bei Einsatz eines Nasswäschers deutlich reduzierte Staubemissionen aufweist (Santonja et al., 2019).

Im Futter enthaltene Abgasbestandteile / Schadstoffe gelten als unproblematisch für Hochleistungskühe, da eine Beimengung des Trocknungsprodukts nur zu 5–10 % der täglichen Futtermenge erfolgt. Für Schweine ist dieser Anteil größer und aus der Feuerung resultierende Schadstoffe sind dem folgend kritischer (H. Schenkel, Persönliche Mitteilung, 19. März 2020).

3.8 Hindernisse beim Einsatz kontinuierlicher Messtechnik bei der Trockengrünherstellung

In Deutschland existieren 37 Trocknungsstandorte. Das Anlagenalter liegt bei durchschnittlich 40 Jahren. Die Produktion erfolgt saisonabhängig in der Vegetationsperiode. Das Eigentum ist genossenschaftlich organisiert (Geschäftsführung Fachverband A Trockengrünherstellung, Persönliche Mitteilung, 11. Januar 2020).

Typischerweise verfügen die Anlagen über eine kontinuierliche Überwachung für Kohlenmonoxid (CO). Die Staubemissionsmessung erfolgt im 3-Jahresrhythmus. Investitionen in eine kontinuierliche Messung gelten als kostenintensiv und letztlich prozessbedingt nicht zwingend notwendig. Hinzu kommt die geringe Margenstruktur im Futtermittelgeschäft gekoppelt mit exponentiell steigenden Primärenergiekosten sowie ein saisonaler Betrieb (Geschäftsführung Fachverband A Trockengrünherstellung, Persönliche Mitteilung, 11. Januar 2020). Im Fazit bedingt das ungünstige Kosten/Nutzen Verhältnis die Zurückhaltung bei der Nachrüstung der Anlagen mit kontinuierlichen Messeinrichtungen (Geschäftsführung Fachverband A Trockengrünherstellung, Persönliche Mitteilung, 11. Januar 2020). Zudem ist bisher aufgrund fehlender rechtlicher Forderungen nur wenig über die Zusammensetzung der Abgasmatrix der Trockenwerke für Trockengrün bekannt.

3.9 Potentiale der Emissionsminderung bei der Trockengrünherstellung

Das Vortrocknen des Grünfutters auf dem Feld durch flächiges Verteilen (**Anwelken**), eingesetzt ebenso bei der Heutrocknung, ermöglicht eine Reduktion der Feuchtigkeit des Ausgangsmaterials um durchschnittlich 60–70 %. Daraus resultiert eine Energieeinsparung von etwa 30 % (Santonja et al., 2019). Darüber hinaus reduziert sich der Brennstoffbedarf zur Erzeugung der Trocknungsenergie um etwa 20–30 %, was mit einer Minderung der feuerungsbedingten Emissionen einhergeht (Santonja et al., 2019). Das BVT-Merkblatt vermerkt zudem eine Reduktion der biogenen, flüchtigen organischen Verbindungen (NMVOC-Emissionen) um etwa 30 % (Santonja et al., 2019). Sofern es die Witterungsbedingungen und Platzverhältnisse vor Ort zulassen, wird dies nach Betreiberauskunft bereits durchgeführt (Qualitätstrocknung Nordbayern eG, o.D.).

Bei der **Brüdenrückführung** wird ein Teil des Trocknerabgases zum Heißgaserzeuger zurückgeführt und der Verbrennungsluft beigemischt. Dadurch wird die bereits enthaltene Energie genutzt und die Menge an zusätzlicher Energie, die durch Verbrennung zur Erwärmung der Luft erforderlich ist, reduziert sich. Dieser positive Effekt mindert sich allerdings etwas, da der mit dem Brüden eingebrachte Wasserdampf ebenfalls erwärmt werden muss. Zudem kommt es zur Aufkonzentration der Schadstoffe des Abgases (Santonja et al., 2019). Gemäß BVT-Merkblatt sind durch diese Maßnahme trotzdem bei 20 Volumenprozent Abgasrückführung ca. 7 % Energieeinsparung zu erwarten (Santonja et al., 2019).

Die Nutzung der Abgase eines Hochtemperaturtrockners als Wärmequelle für einen Niedertemperatur-Vortrockner (**Bandtrockner**) ist aus vielen Branchen bekannt und reduziert den Energiebedarf. Bei Futter mit 80 % Feuchtigkeit verringert diese Technik den Energieverbrauch des Hochtemperaturtrockners um etwa 20 %, indem sie die Eingangsfeuchtigkeit des Grünfutters um 5 % senkt. Diesen ökologischen Vorteilen stehen allerdings vglw. hohe Investitionskosten (Santonja et al., 2019), ein erheblicher Platzbedarf und Wartungsaufwand (Mitarbeiter Technik

Unternehmen E HWS-Industrie, Persönliche Mitteilung, 2. Februar 2021) sowie ggf. zusätzlich Abwasserbehandlungsmaßnahmen (Santonja et al., 2019) gegenüber.

Ferner lassen sich zur Reduktion staubförmiger Emissionen, sofern noch nicht installiert, **Zyklone** und **Nasswäscher** einsetzen. Das BVT-Merkblatt gibt einen Reduzierungseffekt bis zu 70 % bei Einsatz eines Zyklons oder einer Zyklonbatterie an, wobei die Investitionskosten im sechsstelligen Bereich (250.000 € für einen 40.000 l/h Trockner) liegen (Santonja et al., 2019).

3.10 Weiteres Optimierungspotential der Trockenwerke zur Herstellung von Trockengrün

Bei der Trocknung handelt es sich thermodynamisch bedingt, um einen energieintensiven Prozess. Die Anlagen weisen in der Regel Größenordnungen > 1 MW aus. Die überwiegende Anzahl der Anlagen wird mit Erdgas gefeuert. Nur in vier Anlagen wird Kohle bzw. HEL eingesetzt. Ein technischer Ansatz zur Reduktion der Emissionen besteht in der Substitution der Festbrennstoffe durch Erdgas. Theoretisch können auch verstärkt biogene Brennstoffe statt Erdgas eingesetzt werden. Hier spielt wiederum das Kosten/Nutzen Verhältnis die entscheidende Rolle. Exaktere Aussagen sind nur über eine anlagenbezogene Detailbetrachtung möglich und sinnvoll.

Eine technische Neuerung stellt ein elektrisch beheizter Gegenstromtrockner dar. Diese in Norwegen installierte Anlage setzt Hochtemperatur-Wärmepumpen ein, um das erforderliche Temperaturniveau zu erreichen. Damit war es möglich, den Energieverbrauch um 75 % (15.000 MWh pro Jahr) zu senken. Da die Wärmepumpen mit Strom aus erneuerbaren Quellen betrieben werden, lassen sich damit 3.000 t CO₂ pro Jahr sowie sämtliche NO_x-Emissionen einsparen. Der Artikel weist allerdings auch auf den hohen finanziellen Aufwand für die Anschaffung hin (Deutscher Fachverlag GmbH, 2022).

Für einen ökonomischen Betrieb sind zudem möglichst niedrige Strompreise, bestenfalls aus erneuerbaren Quellen, nötig (Deutscher Fachverlag GmbH, 2022).

4 Direkte Trocknung von Zuckerrübenschnitzeln als Futtermittel

4.1 Vorwort zur Datenlage bei der Zuckerrübenschnitzeltrocknung

Während der Projektlaufzeit gelang es nicht, Kontakt zu den Betreibern der 18 in Deutschland aktiven Zuckerfabriken herzustellen. Der Verein der Zuckerindustrie wurde kontaktiert und beantwortete die Fragen der Autoren. Aufgrund von wettbewerbsrechtlichen Beschränkungen bleiben jedoch einige wichtige Informationen, wie die Aufschlüsselung der in deutschen Zuckerfabriken eingesetzten Direkttrocknungsanlagen nach Niedertemperatur- und Hochtemperaturtrocknung, unzugänglich. Daher fehlen in der Studie Details.

Die vorliegenden Aussagen beruhen folgend hauptsächlich auf Informationen einer Überwachungsbehörde zu einem bestimmten Standort, auf Auskünften des Vereins der Zuckerindustrie, frei zugänglichen Informationen im Internet sowie der VDI-Richtlinie 2594 „Emissionsminderung - Schnitzeltrocknungsanlagen der Zuckerindustrie“ (VDI, 2015, September). Letztere befindet sich derzeit in der Überarbeitung und Anpassung an die Anforderungen der überarbeiteten TA Luft. Zudem stützt sich die Studie auf das „Beste verfügbare Techniken (BVT) Referenzdokument für die Lebensmittel-, Getränke- und Milchindustrie (Santonja et al., 2019).

Mangels weiterer Quellen stellt die VDI 2594 die Hauptquelle für Emissionsdaten der Zuckerrübenschnitzel dar. Die zugrunde liegenden Daten stammen aus dem Datenpool oder der Datensammlung eines einzelnen Messinstituts. Eine Anfrage zur Einsicht in die Rohdaten wurde abgelehnt, daher konnten die Emissionsdaten nicht unabhängig verifiziert bzw. ausgewertet werden.

4.2 Rechtliche und normative Grundlagen der Zuckerrübenschnitzeltrocknung

Zuckerrübenschnitzel und extrahierte Zuckerrübenschnitzel entstehen als Nebenprodukt bei der Verarbeitung von Zuckerrüben und werden hauptsächlich als Futtermittel für Rinder, Schweine, Schafe und Pferde verwendet. Je nach Wassergehalt unterscheidet man zwischen Nassschnitzeln, Pressschnitzeln und Trockenschnitzeln. Durch die Zugabe von Melasse können Melasseschnitzel mit höherem Zuckeranteil produziert werden. Als Futtermittel unterliegt es strengen Kontrollen. Tabelle 20 bietet einen Überblick über die relevanten rechtlichen und normativen Grundlagen der Zuckerrübenschnitzeltrocknung.

Tabelle 20: Rechtliche und normative Grundlagen für die Zuckerrübenschnitzeltrocknung

Norm / Richtlinie	Inhalt
Verordnung (EU) 2023/915 (Verordnung (EU) 2023/915, 2023)	Legt Höchstgehalte für Dioxine, Furane, Benzo(a)pyren (PAK) im Trockengut fest.
Richtlinie 2002/32/EG (Richtlinie 2002/32/EG, 2002)	Führt Schadstoffgrenzwerte für Dioxine und PAK bei Trocknung auf (z.B. Auslösewert für Dioxine: 500 pg I-TEQ/kg).
Industrie-Emissionsrichtlinie (2010/75/EU) (Richtlinie 2010/75/EU, 2010)	Basis für BVT-Schlussfolgerungen, umgesetzt durch die-TA Luft.
Durchführungsbeschluss 2019/2031 (BVT Nahrungsmittel-)	Schlussfolgerungen zu den besten verfügbaren Techniken (BVT) für die Nahrungsmittel-, Getränke- und Milchindustrie

Norm / Richtlinie	Inhalt
tel-, Getränke- und Milchindustrie, 2019)	
Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG, 1974/2013)	Nationaler rechtlicher Rahmen für Emissionsschutz.
Verordnung über genehmigungsbedürftige Anlagen (4. BImSchV, 2017)	Es besteht Genehmigungs- und Überwachungspflicht gemäß Nr. 7.24 des Anhangs 1.
Lebensmittel- und Futtermittelgesetzbuch (LFGB, 2013)	Nationaler rechtlicher Rahmen für Lebensmittel- und Futtermittelsicherheit. Allgemeine Grundlagen für die Herstellung und Verarbeitung von Futtermittel, aber keine Emissionsgrenzwerte.
TA Luft 2021 (TA Luft, 2021)	Setzt BVT-Schlussfolgerungen zur Zuckerrübenschnitzeltrocknung großteils in nationales Recht um. Neben allgemeinen Anforderungen (bspw. Abschnitt 5.25) ist speziell Abschnitt 5.4.7.24 (Anlagen der Nummer 7.24 4. BImSchV) zu beachten.
Allgemeine Verwaltungsvorschrift (NaGeMi-VwV, 2024)	Setzt BVT-Schlussfolgerungen zur Zuckerrübenschnitzeltrocknung vollständig in nationales Recht um. Die NaGeMi-VwV fordert oder regelt die Reduzierung von Emissionen und Umweltauswirkungen in der Nahrungsmittel-, Getränke- und Milchindustrie, indem sie spezifische Grenzwerte und Maßnahmen zur Energieeffizienz vorschreibt.
Futtermittelverordnung (FuttMV, 1981/2016)	Die FuttMV bildet zusammen mit Teilen des höherrangigen LFGB den Kern des deutschen Futtermittelrechts. Neben allgemeinen Anforderungen an die Prozessdokumentation der Trocknungsanlagenbetreiber enthält die FuttMV spezifische Anforderungen an den Trocknungsprozess selbst (z. B. Anlage 4 Punkt 3), aber keine Grenzwerte.
VDI-Richtlinie 2594 (VDI, 2015, September)	Richtlinie zum Stand der Technik und Maßnahmen der Emissionsminderung bei Schnitzeltrocknungsanlagen der Zuckerindustrie, derzeit in Überarbeitung.

4.3 Grundsätzliche Einordnung des Anwendungsgebietes Zuckerrübenschnitzeltrocknung sowie der darin angewandten Trocknung

2014/2015 gab es in 19 EU-Mitgliedsstaaten Anlagen zur Zuckerherstellung, wobei 70 % der Produktion auf vier Länder entfielen (Santonja et al., 2019). Die deutsche Zuckerindustrie produziert seit über 80 Jahren an 18 Standorten im ländlichen Raum (Geschäftsführung Fachverband A Zuckerindustrie, Persönliche Mitteilung, 10. September 2020). Laut BVT-Merkblatt waren diese 18 Standorte für rund ein Viertel der EU-Zuckerproduktion verantwortlich (Santonja et al., 2019). Die Rübenzuckerindustrie in der EU sichert rund 180.000 Arbeitsplätze und unterstützt etwa 140.000 landwirtschaftliche Betriebe (Santonja et al., 2019).

Schnitzeltrocknungsanlagen sind Bestandteil einer Zuckerrübenfabrik. In Deutschland wird Zucker hauptsächlich aus Zuckerrüben von den marktbeherrschenden Unternehmen Südzucker AG, Nordzucker AG und Pfeifer & Langen gewonnen (Wikipedia-Autoren, 2019). Das Hauptprodukt der Zuckerrübenverarbeitung ist Kristallzucker (Saccharose). Nebenprodukte sind Melasse, Carbonatationskalk (Dünger) und Rübenschnitzel (frisch oder siliert) (Geschäftsführung Fachverband A Zuckerindustrie, Persönliche Mitteilung, 10. September 2020).

Die Anlagen arbeiten im Kampagnenzyklus (ca. 6 Monate), beginnend im September. Der Rest des Jahres wird für Wartung und Instandhaltung genutzt (Geschäftsführung Fachverband A Zu-

ckerindustrie, Persönliche Mitteilung, 10. September 2020). Teilweise laufen die Anlagen zur Verarbeitung von Rohsirup weiter (Nordzucker AG, o.D.b). Silo- und Verpackungsanlagen sind ganzjährig in Betrieb (Geschäftsführung Fachverband A Zuckerindustrie, Persönliche Mitteilung, 10. September 2020). Außerhalb der Kampagne wird teilweise auch Luzerne und Mais getrocknet (Santonja et al., 2019).

Die Trocknungsanlage einer Zuckerfabrik ist immer Teil der Betriebsgenehmigung der gesamten Zuckerfabrik (Geschäftsführung Fachverband A Zuckerindustrie, Persönliche Mitteilung, 10. September 2020).

4.4 Beschreibung des Einsatzstoffes Zuckerrübenschnitzel

Zuckerrübenschnitzel sind ein Nebenprodukt der Zuckerrübenverarbeitung, deren Rübenkörper zu 75–78 % aus Wasser besteht (Santonja et al., 2019). Nach verschiedenen Vorbearbeitungsschritten und der Extraktion des Rohsafts liegen die Rübenschnitzel vor. Die unterschiedliche Beschaffenheit des Rübenmaterials sowie der Vorbehandlung in der Extraktion und den Schnitzelpressen führt zu einem inhomogenen Trockengut. Dies hat Auswirkungen auf den Trocknungsprozess (VDI, 2015, September).

Anwendung finden Rübenschnitzel als Futtermittel für Nutztiere wie Rinder, Schweine, Schafe und Pferde. Je nach Wassergehalt unterscheidet man zwischen Nassschnitzeln, Pressschnitzeln und Trockenschnitzeln. Nach der Rohsaftextraktion haben die Nassschnitzel einen Trockenmassegehalt von 8 bis 10 %, der durch mechanisches Abpressen auf etwa 28 % erhöht werden kann. Eine optionale thermische Trocknung kann den Trockenmassegehalt weiter auf bis zu 90 % steigern (Wikipedia-Autoren, 2021).

Bei der Trocknung der Rübenschnitzel ergeben 100 kg Zuckerrüben etwa 5,6 kg Trockenschnitzel. Durch Zugabe von 1–3 % Melasse² (bezogen auf das Trockengewicht der Schnitzel) kann der Zuckergehalt auf 9–30 % erhöht werden (Santonja et al., 2019). Ein höherer Zuckergehalt bei Trockengrün deutet auf eine erhöhte Schmackhaftigkeit beim Nutztier hin, sodass sich für Zuckerrübenschnitzel ein ähnlicher Zusammenhang vermuten lässt.

4.5 Grundlegender Verfahrensablauf des Prozesses sowie der Trocknung von Zuckerrübenschnitzeln

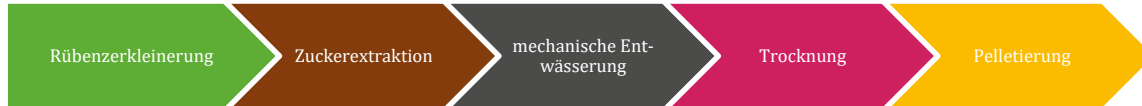
Die Zuckergewinnung aus Zuckerrüben ist nicht Bestandteil dieser Arbeit, kann aber in einschlägiger Literatur nachgelesen werden (Osteroth, 1991; van Poel, 2000). Der folgende Abschnitt ordnet die Rübenschnitzeltrocknung in den Gesamtprozess, vereinfacht dargestellt in Abbildung 16 (Seite 109), der Zuckerherstellung ein. Nach der Reinigung der Zuckerrüben, bei der Erde, Steine und Rübenkraut entfernt werden, erfolgt die Zerkleinerung in Schneidmaschinen zur Oberflächenvergrößerung. Die so entstandenen Rübenschnitzel durchlaufen eine Gegenstromextraktion bei etwa 70–75 °C, wodurch die Saccharose nahezu vollständig entzogen ist (Nordzucker AG, 2022; VDI, 2015, September).

Der daraus resultierende „Dünnsaft“ unterliegt mehreren Reinigungsschritten und wird aufkonzentriert, bis der Zucker auskristallisiert und in Zentrifugen abgetrennt ist. Neben Rohzucker entsteht dabei Melasse, ein sirupartiges Nebenprodukt, das in der Schnitzelanreicherung sowie in der Hefe-, Fermentations- und Mischfutterindustrie Einsatz findet (Geschäftsführung Fachverband A Zuckerindustrie, Persönliche Mitteilung, 10. September 2020; Nordzucker AG, 2022; VDI, 2015, September). Der Zucker durchläuft zur Erhöhung der Reinheit im Falle von Raffinade eine erneute Auflösung und Auskristallisation oder gelangt direkt in einen Zuckertrockner. Nach der

² Melasse ist ein hochviskoser, dunkelbrauner Zuckersirup, der als Nebenerzeugnis bei der Zuckerproduktion entsteht.

Kühlung folgt der Transport in Silos, die Sortenaufbereitung nach Kundenanforderung und Abverpackung. Die wichtigsten Prozessschritte zur Rübenschnitzelherstellung fasst Abbildung 11 zusammen.

Abbildung 11: Vereinfachte Darstellung der Verfahrensschritte der Trockenschnitzelherstellung



Quelle: eigene Darstellung, DBI-Gruppe 2022

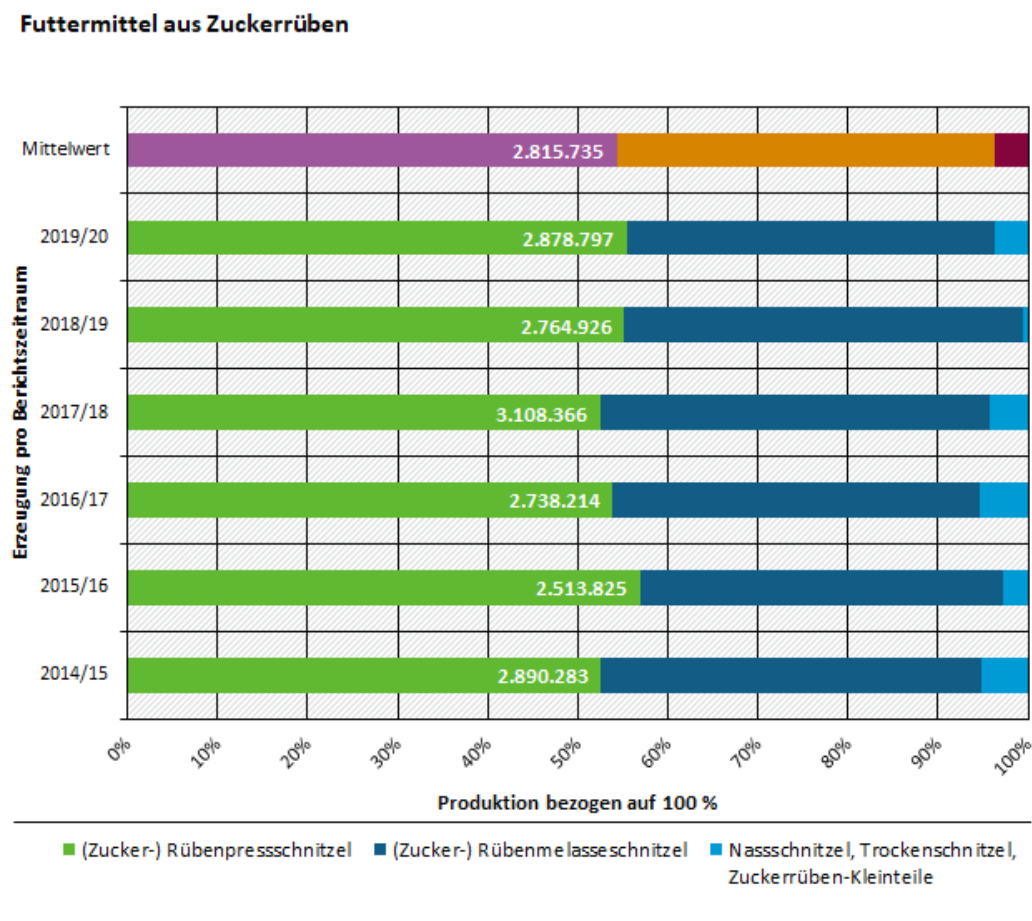
Die entzuckerten Schnitzel zweigen nach der Extraktion ab und gelangen bei entsprechender Nähe zu einem Absatzmarkt direkt in den Verkauf (u.a. (Santonja et al., 2019; VDI, 2015, September)). Das zugehörige BVT-Merkblatt erwähnt zudem eine betriebsinterne Nutzung als Substrat in Biogasanlagen, was als Hemmnis für die später erwähnte Niedertemperaturtrocknung gilt (Santonja et al., 2019). Findet keine direkte Veräußerung oder Anwendung als Substrat statt, folgen der Extraktion Melassierung sowie mechanische und thermische Trocknung, wobei diese Weiterverarbeitungsschritte nicht zwangsweise erforderlich sind (Santonja et al., 2019).

Gemäß Jahresbericht 2020 | 2021 des „Verein der Zuckerindustrie e.V.“ ist die Produktion der Rübenschnitzel über die letzten Jahre weitestgehend konstant (Wirtschaftliche Vereinigung Zucker e. V. & Verein der Zuckerindustrie e. V [VdZ], 2021) und für die Berichtszeiträume seit 2014/2015 in Abbildung 12 dargestellt. Die Abbildung zeigt die erzeugten Futtermittel aus Zuckerrüben, bezogen auf die 100% Jahresproduktion, in verschiedenen Jahren, von 2014/15 bis 2019/20. Jeder Balken repräsentiert ein Jahr und ist in verschiedene Farben unterteilt, die die unterschiedlichen Futtermittelarten darstellen:

- Grün (MW rosa): (Zucker-) Rübenpressschnitzel
- Braun (MW Orange): (Zucker-) Rübenmelasseschnitzel
- Blau (MW Rot): Nassschnitzel, Trockenschnitzel, Zuckerrüben-Kleinteile

Oben befindet sich ein Mittelwertbalken, der die durchschnittliche Produktion über die betrachteten Jahre zeigt. Die Produktionsmengen sind in Tonnen angegeben und am rechten Ende jedes Balkens dargestellt. Die durchschnittliche Jahresproduktion besteht fast ausschließlich aus (Zucker-) Rübenpress- und Rübenmelasseschnitzeln, da sich im Durchschnitt weniger als 5 Massenprozent aus Nassschnitzeln, Trockenschnitzeln und Zuckerrübenkleinteilen ergeben. Die Grafik zeigt eine Schwankung der Gesamtproduktion über die Jahre, mit detaillierten Anteilen der verschiedenen Futtermittelarten.

Abbildung 12: Erzeugte Futtermittel aus Zuckerrüben bezogen auf 100 % Jahresproduktion



Quelle: eigene Darstellung, DBI-Gruppe 2022, basierend auf Jahresbericht VdZ 2020/2021 (VdZ, 2021)

Legt man Abbildung 12 die Beschreibungen aus dem Verzeichnis der Einzelfuttermittel aus Verordnung (EU) 2017/1017 (Verordnung (EU) 2017/1017, 2017) zugrunde (siehe Tabelle 21), liegt nahe, dass die Position (Zucker-) Rübenpressschnitzel mit melassierten Rübenpressschnitzeln gleichzusetzen ist. Diese sind gemäß Tabelle 21 mechanisch abgepresst und mit Melasse versetzt, aber nicht getrocknet, und finden somit werksnah Verwendung. Als gesichert gilt somit, dass im Mittel etwa 42 Massenprozent, also ca. 2/5, als mechanisch sowie thermisch getrocknete (Zucker-) Rübenmelasseschnitzel veräußert werden.

Tabelle 21: Erläuterungen zu den in Abbildung 12 verwendeten Begrifflichkeiten.(Verordnung (EU) 2017/1017, 2017)

Bezeichnung	Erläuterung*
Rübenpressschnitzel	Erzeugnis aus der Zuckerherstellung, das aus mit Hilfe von Wasser entzuckerten Zuckerrübenschnitzeln besteht, die mechanisch abgepresst wurden. Feuchtigkeitsgehalt höchstens 82 %. Der Zuckergehalt ist gering und sinkt durch (Milchsäure-)Vergärung gegen Null.
Rübenpressschnitzel, melassiert	Erzeugnis aus der Zuckerherstellung, das aus mit Hilfe von Wasser entzuckerten Zuckerrübenschnitzeln besteht, die mechanisch abgepresst und mit Melasse versetzt wurden. Feuchtigkeitsgehalt höchstens 82 %. Der Zuckergehalt nimmt bedingt durch die (Milchsäure-)Vergärung ab.

Bezeichnung	Erläuterung*
Rübetrockenschnitzel	Erzeugnis aus der Zuckerherstellung, das aus mit Hilfe von Wasser entzuckerten Zuckerrübenschnitzeln besteht, die mechanisch abgepresst und getrocknet wurden.
Rübenmelasseschnitzel, getrocknet	Erzeugnis aus der Zuckerherstellung, das aus mit Hilfe von Wasser entzuckerten Zuckerrübenschnitzeln besteht, die mechanisch abgepresst, getrocknet und mit Melasse versetzt wurden.

* gemäß Verordnung (EU) 2017/1017 (Verordnung (EU) 2017/1017, 2017)

Die wesentlichen Verfahrensschritte der Zuckerrübenschnitzeltrocknung sind (VDI, 2015, September):

1. Mechanisches Entwässern durch Abpressen mithilfe von Spindelpressen,
2. Thermisches Entwässern bis zu einem Restwassergehalt von 10 Massenprozent.

Für die mechanische Entwässerung kommen typischerweise Einspindel- und Doppelspindelpressen zum Einsatz, die den Wassergehalt um 65–70 Massenprozent reduzieren (VDI, 2015, September). Laut (VDI, 2015, September) ist der Trockensubstanzgehalt umso höher, je geringer der Schnitzeldurchsatz ist. Die mechanische Entwässerung lässt sich durch Beladung des Schnitzelgewebes mit Kalziumionen (0,1–0,17 kg Gips je 100 kg Rüben) optimieren.

Heutigen Anlagen erreichen die physikalischen Grenzen der mechanischen Schnitzelentwässerung, wobei Spitzenwerte bei ca. 36 % Trockensubstanzgehalt liegen (VDI, 2015, September). Weitere Maßnahmen zur Erhöhung des Trockensubstanzgehalts gehen mit hohen Kapital- und Instandhaltungskosten einher (exponentieller Anstieg je Tonne zusätzlichen Wasseraustrags) (VDI, 2015, September). Pressschnitzel können wie Nassschnitzel zu Geruchsproblemen führen (Santonja et al., 2019).

Die unterschiedliche Beschaffenheit des Rübenmaterials sowie der Vorbehandlung in der Extraktion und den Schnitzelpressen führt zu einem inhomogenem Trockengut mit entsprechenden Auswirkungen auf den thermischen Trocknungsprozess (VDI, 2015, September). Prinzipiell erfolgt die Zufuhr von thermischer Energie und damit die Überführung von Rübenwasser in Dampfform sowie dessen Abtransport in folgenden drei Schritten (Santonja et al., 2019):

1. Verdampfen des Oberflächenwassers: Bei hohem Wassergehalt in der kapillar-porösen Zellstruktur der Schnitzel erfolgt ein schneller Transport von Wasser an die Oberfläche. Die Rübenschnitzel behalten eine feuchte Oberfläche, und die Trocknungsgeschwindigkeit ist entsprechend hoch,
2. Innere Verdampfung in den Rübenschnitzeln: Mit sinkendem Feuchtigkeitsgehalt nimmt die Trocknungsgeschwindigkeit ab und tendiert bei Annäherung an den hygroskopischen Gleichgewichtsfeuchtigkeitsgehalt gegen Null,
3. Verdampfen des restlichen, durch Kapillarkräfte physikalisch an das Trocknungsgut gebundenen Wassers: Die Trocknung verlangsamt sich weiter.

Niedrige Restwassergehalte der Schnitzel stellen Anforderungen an die relative Feuchte des Trocknungsgases oder die Überhitzung des Dampfes, was einen hohen Energieeintrag bedingt (VDI, 2015, September). Verdampfung und Trocknung der Rübenschnitzel (Wärmeenergie) sind neben dem Pumpen und Zentrifugieren (Elektroenergie) die wesentlichen Energiesenken der Zuckerrübenproduktion. Der spezifische Energieverbrauch (MWh/Tonne Zuckerrüben) verschiedener Zuckerrübenanlagen liegt im Mittel zwischen 0,2–0,4 MWh/t Zuckerrübe (Santonja et al., 2019). Dies geht einher mit der Aussage, dass die Schnitzeltrocknung für Zuckerfabriken

ein sehr energieaufwändiger Prozess mit geringer Wertschöpfung ist (Geschäftsführung Fachverband A Zuckerindustrie, Persönliche Mitteilung, 10. September 2020).

Vorteile der Trocknung (Geschäftsführung Fachverband A Zuckerindustrie, Persönliche Mitteilung, 10. September 2020):

- ▶ Reduktion der Frachtkosten aufgrund geringerer Masse und damit der CO₂-Emissionen beim Transport,
- ▶ Erhöhung der Haltbarkeit,
- ▶ Verringerung der Geruchsbelastung,
- ▶ Erhöhung des möglichen Melassegehalts und damit bessere Annahme durch Nutztiere.

4.6 Trocknung und Trockner der Zuckerrübenschnitzeltrocknung im Detail

In der deutschen Zuckerindustrie kommen Trocknungsanlagen unterschiedlicher Konfiguration zur Herstellung von Trockenschnitzeln zum Einsatz. Hinsichtlich der Trocknungsart unterscheidet man prinzipiell zwischen Verdunstungs- und Verdampfungstrocknung.

4.6.1 Trocknungsarten der Zuckerrübenschnitzeltrocknung

Bei der **Verdunstungstrocknung** nimmt warme, trockene Luft Wasserdampf bis zur Sättigung auf. Dies geschieht entweder bei der *Niedertemperaturtrocknung* (NTT) zwischen 50 °C (Eintritt) und 30 °C (Austritt) oder bei der *Hochtemperaturtrocknung* (HTT) zwischen 750 °C und 100 °C (Eintritt und Austritt) (VDI, 2015, September).

Aufgrund der niedrigeren Triebkräfte bei der *NTT* sind signifikant höhere Trocknungsgasvolumenströme nötig, sodass der Gasdurchsatz etwa 30-mal höher liegt. Dies führt zu einem höheren Stromverbrauch für Ventilatoren und einem höheren anlagen-technischen Wartungsaufwand. Die NTT findet vorwiegend im ersten Trocknungsabschnitt unter Verwendung von Bandtrocknern statt. Die Melassierung der Rübenschnitzel erfolgt nach der Trocknung (VDI, 2015, September).

Die *HTT* stellt das weltweit am häufigsten eingesetzte Verfahren dar. Hierbei kommen direkt beheizte Trommeltrockner zum Einsatz, wobei die bereits melassierten Pressschnitzel und das Trocknungsgas im Gleichstrom geführt werden. Temperatur und relative Feuchte des Trocknungsgases beim Eintritt in die Trocknungstrommel bestimmen die aufnehmbare Wassermenge pro kg trockenes Gas. Das Trocknungsgas besteht aus einer Mischung aus Feuerungsgas, Rauchgas der Dampferzeugung (einzige Verbindung zur Zuckerfabrik) sowie „Falsch“- und Kühlluft. Die Feuerungsgase tragen zu etwa 30 % zum Massenstrom und ca. 75 % zum Energiestrom des Trocknungsprozesses bei, während Rauchgase etwa 50 % des Massenstroms und 25 % des Energiestroms ausmachen. Diese Gase entstehen durch die Verbrennung am Standort verfügbarer Primärenergieträger (VDI, 2015, September).

Die **Verdampfungstrocknung** nutzt überhitzten Wasserdampf als Trocknungsgas. Dessen Zusammensetzung bleibt konstant, während die Menge im Verlauf der Trocknung zunimmt. Der überschüssige Dampf wird ähnlich dem aus der Holzwerkstoffindustrie bekannten UWTS-Prinzip abgezweigt. Diese schonende Trocknungsmethode transportiert die Schnitzel durch Zellrad-schleusen in den und aus dem Trockner. Beim Ausschleusen kühlt das Trocknungsgut schlagartig um über 30 K ab, wodurch der Überschussdampf kondensiert (VDI, 2015, September).

Der Arbeitsdruck des Verdampfungstrockners und der Heißdampfdruck lassen sich so wählen, dass die Trocknung als Dampfumformschritt optimal ins energetische Gesamtkonzept (Kraft-Wärme-Kopplung, Mehrfacheffektverdampfung und Abwärmenutzung) integriert wird. Dadurch entstehen erhebliche Energieeinsparungen. Aufgrund der Komplexität ist diese Technologie jedoch nur bei Neubauten realisierbar (Geschäftsführung Fachverband A Zuckerindustrie, Persönliche Mitteilung, 10. September 2020; VDI, 2015, September).

4.6.2 Trocknertypen und ihre Anwendung bei der Zuckerrübenschnitzeltrocknung

Im Wesentlichen kommen drei verschiedene Trocknerbauarten zum Einsatz, wobei Bandtrockner vordergründig für die Vortrocknung Anwendung finden (Mitarbeiter Verkauf Anlagenhersteller A., Persönliche Mitteilung, 2. März 2021; Santonja et al., 2019; VDI, 2015, September). Deren Aufbau unterscheidet sich aus technischer Sicht nur unwesentlich von dem für andere Trocknungsgüter, sodass dieser hier nur kurz beschrieben werden soll.

Bandtrockner: Bandtrockner besitzen siebförmige Trockenbänder, die bis 120 °C belastbar sind und bei moderaten Temperaturen von 50–80 °C mit hohen Volumenströmen des Trocknungsmediums arbeiten. Der Trockenguttransport erfolgt horizontal und in Einzeletagenbauart. Umlenkungen oder Umschichtungen gibt es nicht, außer bei Mehretagen-Bandtrocknern. Auch als Nach- oder Paralleltrockner steigern sie die Energieeffizienz der Rübenschnitzeltrocknung und somit der Standorte.

Vor- und Nachteile der Nutzung von Bandtrockner (NTT)

- ▶ Nutzung von Rest- oder Abwärmepotential möglich, spart im Vergleich zur reinen HTT etwa 30% Energie (Mitarbeiter Technik Unternehmen E HWS-Industrie, Persönliche Mitteilung, 2. Februar 2021; Mitarbeiter Verkauf Anlagenhersteller A., Persönliche Mitteilung, 2. März 2021; Santonja et al., 2019; VDI, 2015, September),
- ▶ Einsatz von niedrig temperierten Wärmequellen ermöglicht schonende Trocknung, senkt Brandgefahr und reduziert Emissionen flüchtiger organischer Verbindungen (VOCs) (Mitarbeiter Technik Unternehmen E HWS-Industrie, Persönliche Mitteilung, 2. Februar 2021; VDI, 2015, September),
- ▶ Weniger Zusatzgeräte für die Behandlung der Emissionen nötig (Roos, 2008 (rev. 2013),
- ▶ Abwärmenutzung erhöht den Elektroenergiebedarf für Ventilatoren und führt zu höheren Betriebs- und Wartungskosten im Vergleich zu Drehrohtrocknern (VDI, 2015, September),
- ▶ Flexibilität hinsichtlich zeitlichem Einsatz und weiteren Trocknungsprodukten (Santonja et al., 2019),
- ▶ Geschichtetes Trocknungsgut besitzt Filterwirkung; widersprüchliche Angaben zu Staubemissionen (Reduzierung (Mitarbeiter Verkauf Anlagenhersteller A., Persönliche Mitteilung, 2. März 2021; Roos, 2008 (rev. 2013) oder gleichbleibende Emission (Mitarbeiter Technik Unternehmen E HWS-Industrie, Persönliche Mitteilung, 2. Februar 2021))
- ▶ Vergleichsweise große Stellflächen für Bandtrockner erforderlich oder gesteigerte Staubemissionen bei Mehretagentrocknern an Umlenkungen (Mitarbeiter Technik Unternehmen E HWS-Industrie, Persönliche Mitteilung, 2. Februar 2021; Mitarbeiter Verkauf Anlagenhersteller A., Persönliche Mitteilung, 2. März 2021)

- ▶ Hohe Volumenströme führen zu mehreren Abgasöffnungen mit nicht exakt genormten Geometrien, was zu Schwierigkeiten bei der Emissionsmessung führt (Mitarbeiter Technik Unternehmen E HWS-Industrie, Persönliche Mitteilung, 2. Februar 2021).

Zum Zeitpunkt der Recherche sind in deutschen Zuckerfabriken je nach Quelle 3–5 NTT-Bandtrockner als Vortrockner installiert (Geschäftsführung Fachverband A Zuckerindustrie, Persönliche Mitteilung, 10. September 2020; Santonja et al., 2019). Im europäischen Ausland existiert seit 2017 ein Bandtrockner in Polen, welcher bis auf Endfeuchte trocknet (Mitarbeiter Verkauf Anlagenhersteller A., Persönliche Mitteilung, 2. März 2021). NTT-Bandtrockner finden teilweise auch als Nach- oder Paralleltrockner mit direktem oder indirektem Anschluss an einen HTT-Trockner Verwendung, um die Flexibilität hinsichtlich des zeitlichen Einsatzes und zur Trocknung weiterer Güter zu erhöhen (Santonja et al., 2019).

Drehrohrtrockner: Drehrohrtrockner, auch Trommeltrockner genannt, sind weltweit die häufigste Trocknerbauart. Sie bestehen aus einem rotierenden Zylinder und transportieren kontinuierlich das Trocknungsgut. Der Aufbau kann als Einzugstrommeln oder Dreizugtrommeln erfolgen. Stand der Technik ist die Rückführung der Trocknungsgase und die Nutzung der Restwärme (Santonja et al., 2019; VDI, 2015, September). An 14 deutschen Standorten kommen diese Trockner zum Einsatz, ggf. in Kombination mit NTT-Bandtrocknern als Vortrockner (Geschäftsführung Fachverband A Zuckerindustrie, Persönliche Mitteilung, 10. September 2020). Eine detaillierte Aufschlüsselung ist den Autoren der Studie bekannt, darf gemäß Mitteilung VdZ aus wettbewerbsrechtlichen Gründen nicht offen gelegt werden (Geschäftsführung Fachverband A Zuckerindustrie, Persönliche Mitteilung, 4. November 2020).

Vorteile der Nutzung direkt trocknender Drehrohrtrockner (HTT) (Geschäftsführung Fachverband A Zuckerindustrie, Persönliche Mitteilung, 10. September 2020)

- ▶ Quasi unabhängig vom Zuckergewinnungsprozess,
- ▶ Einbindung von Abwärme aus anderen Herstellungsprozessen möglich,
- ▶ Variabler Melassierungsgrad,
- ▶ Weniger komplexe Betriebsführung, wodurch der Wartungsaufwand sinkt,
- ▶ Geringerer Elektroenergiebedarf,
- ▶ Weniger abhängig von energetischen Gegebenheiten,
- ▶ Reinigung der Carbonatationsbrüden durch NO_x aus Rauchgas realisierbar.

Wirbelschichttrockner: Die indirekte Trocknung mittels Wirbelschichttrockner erfolgt durch zirkulierenden überhitzten Dampf, der eine Fluidisierung des Trocknungsguts bewirkt. Die Anlage besteht aus mehreren Zellen zur Anpassung der Verweilzeit. Melasse kann nach der Trocknung zugegeben werden, was die Produktqualität beeinflusst (Geschäftsführung Fachverband A Zuckerindustrie, Persönliche Mitteilung, 10. September 2020). Diese Trockner sind in das energetische Gesamtkonzept des Standorts integriert, senken den Gesamtenergieverbrauch der Anlage und benötigen mangels Alternativen eine Nasswäscher-Anlage zur Abgasreinigung (Geschäftsführung Fachverband A Zuckerindustrie, Persönliche Mitteilung, 10. September 2020). Aufgrund der Komplexität und Kosten ist diese Technik vor allem für neue Standorte wirtschaftlich sinnvoll (Geschäftsführung Fachverband A Zuckerindustrie, Persönliche Mitteilung, 10. September 2020; VDI, 2015, September).

Vorteile der Nutzung indirekt trocknender Wirbelschichttrockner (Geschäftsführung Fachverband A Zuckerindustrie, Persönliche Mitteilung, 10. September 2020; VDI, 2015, September):

- ▶ Gesamtanlage energetisch effizienter ³, damit geringerer Brennstoffbedarf und Reduktion der daran gebundenen Emissionen,
- ▶ Geruchsfracht von Verdampfungstrocknern beträgt etwa 10 % bis 100 % der von Hochtemperaturtrocknern,
- ▶ Bei Einbindung des Abgases in die Verbrennungsluftzufuhr der Kesselanlagen entstehen keine trocknungsbedingten Emissionen, abgesehen von denen durch die Verbrennung zur Dampferzeugung.
- ▶ Diese Trockner sind an fünf Standorten in Deutschland im Einsatz. Eine genaue Aufschlüsselung der Standorte ist den Autoren der Studie bekannt, darf jedoch laut Mitteilung des VdZ aus wettbewerbsrechtlichen Gründen nicht veröffentlicht werden (Geschäftsführung Fachverband A Zuckerindustrie, Persönliche Mitteilung, 10. September 2020).

4.6.3 Zur Erzeugung der Trocknungsenergie eingesetzte Brennstoffe

Der Branchenverband VdZ berichtet in einer Stellungnahme, dass zur Energieversorgung der Standorte ein Brennstoffmix aus Gas, Schweröl, Braunkohle und Steinkohle verwendet wird. Der Anteil gasförmiger Brennstoffe, einschließlich Biogas, soll dabei über 60 % betragen. Strom aus dem öffentlichen Netz wird nur außerhalb der Produktionskampagnen genutzt. Während der Kampagnen erzeugen alle Standorte ihren Strom selbst (Geschäftsführung Fachverband A Zuckerindustrie, Persönliche Mitteilung, 10. September 2020).

Aus wettbewerbsrechtlichen Gründen sind die energietechnischen Details der einzelnen Standorte nicht öffentlich zugänglich (Geschäftsführung Fachverband A Zuckerindustrie, Persönliche Mitteilung, 10. September 2020). Der Einsatz von Kohle nimmt generell ab. Die Firma Pfeifer und Langen plant, bis 2021 am Standort Jülich aus der Kohlenutzung auszusteigen und bis 2023 bzw. 2030 auch an den Standorten Euskirchen und Könnern (Pfeifer & Langen GmbH & Co. KG, 2021).

4.7 Abgasvolumenströme, Abgasleitung und Abgasnachbehandlung der Zuckerrübenschnitzeltrocknung

Die VDI 2594 spezifiziert für Verdunstungstrockner (HTT, Trommeltrockner) einen Abgasvolumenstrom von 70.000–270.000 m³/h (tr), eine Trommelaustrittstemperatur von 95 °C–105 °C und eine Feuchtebelastung von 150 g/m³ (tr)–400 g/m³ (tr). Der typische Restsauerstoffgehalt im Trocknungsabgas beträgt 7–10 Volumenprozent. Der Rohgasvolumenstrom eines Verdampfungstrockners (Wirbelschichttrockner) liegt bei 2000 m³/h (f)–6000 m³/h (f) bei 95 % relativer H₂O-Dampf-Sättigung. Diese Angaben beziehen sich auf einzelne Trockner; der Ausstoß vervielfacht sich bei mehreren Trocknern entsprechend (VDI, 2015, September).

Bei Verdampfungstrocknern wird der im Kreislauf geführte Dampf kontinuierlich überhitzt. Das im Trockengut enthaltene Wasser verdampft aufgrund der Temperaturdifferenz zwischen Kreislaufdampf und Trockengut. Somit muss bei diesem Prinzip nur die aus dem Trockengut ausgetretene Wassermenge als Dampf (Brüden) abgeführt werden. Bei der Kondensation des aus dem Verdampfungstrockner abgezogenen Brüdenanteils und am Schnitzelaustritt der Zellrad-schleuse entsteht Rohgas. Dieser Rohgasvolumenstrom ist vergleichsweise gering und beträgt

³ Einbau des Verdampfungstrockner führt zu Primärenergieeinsparung in Höhe von 25 Prozent Nordzucker AG (o.D.a)

2000 bis 6000 m³/h (f). In Deutschland werden in fünf Anlagen (Stand 2002) Pressschnitzel mit Kapazitäten von 40 bis 85 t/h getrocknet, wobei 25 bis 55 t/h Wasser verdampft werden und große Mengen Kondensat als Abwasser anfallen. Im Kondensat wurden TOC-Frachten von 15 bis 25 kg/h gemessen (VDI, 2015, September).

Während der Studie wurde zumindest ein Fließbild der Emissionen eines Standorts erlangt, das auf Brüdenrückführung hinweist (Referent:in Regierungspräsidium Kassel, Persönliche Mitteilung, 14. Oktober 2020). Weitere Abgasnachbehandlungsmaßnahmen sind nicht verzeichnet, aber nicht ausgeschlossen. Das BVT-Merkblatt listet Zyklone und Nasswäscher als mögliche Abgasnachbehandlungsmaßnahmen, jedoch ohne deutsche Referenzstandorte für Zyklone (Santonja et al., 2019). Für Gesamtstaub, Gesamtkohlenstoff und Schwefeloxid sind ein bis drei Referenzstandorte ausgewiesen, was auf die Anwendung dieser Techniken zur Abgasreinigung hinweist (Santonja et al., 2019).

Der Branchenfachverband berichtet, dass Stickoxide teilweise zur Reinigung des Carbonatsbrüden genutzt werden, wodurch das Abgas indirekt gereinigt wird (Geschäftsführung Fachverband A Zuckerindustrie, Persönliche Mitteilung, 10. September 2020). Eine behördliche Übersicht zeigt, dass Ammoniakreduzierung (NH₃) in Carbonatationsbrüden durch Verbrennung im Drehrohrtrockner (HTT) erreicht wird. Ein Nasswäscher folgt der Trocknung. Die Umstellung auf Indirekt Trocknungstechnik führt jedoch zum Wegfall der Rauchgasentstickung durch selektive nichtkatalytische Reduktion, was auf deren Anwendung hinweist (Geschäftsführung Fachverband A Zuckerindustrie, Persönliche Mitteilung, 10. September 2020). Diese Aussage könnte sich jedoch auf den Gesamtstandort beziehen und ist nicht zwingend für die Heißgaserzeugung der Trockner anzunehmen.

Ein Artikel von Freudenberg über das Zuckerwerk Wabern berichtet über die Reduktion des Ammoniakgehalts im Carbonatationsbrüden von ca. 1000 mg/m³ auf 11 mg/m³ im Gesamtbrüden der Schnitzeltrocknungsanlage und auf 12 mg/m³ bei Zugabe in die Brennkammer des Trommeltrockners 2. Diese Maßnahme unterschreitet den Grenzwert von 30 mg/m³ deutlich bei gleichbleibendem NO_x. Die Autoren schließen daraus, dass eine tatsächliche Eliminierung des Ammoniaks durch eine selektive nicht-katalytische Reaktion (SNCR-Verfahren) erfolgte und keine Verdünnung durch den größeren Volumenstrom stattfand (Freudenberg, 2008).

4.8 Von der Zuckerrübenschnitzeltrocknung beeinflusste, behördlich überwachte Emissionen

4.8.1 Gesetzliche Forderungen an die Emissionsüberwachung der Zuckerrübenschnitzeltrocknung

Die gesetzlichen Grundlagen der Emissionsüberwachung basieren hauptsächlich auf dem Durchführungsbeschluss (BVT-Schlussfolgerungen) 2019/2031 der Europäischen Kommission für die Lebensmittel-, Getränke- und Milchindustrie (BVT Nahrungsmittel-, Getränke- und Milchindustrie, 2019). Die vollständige Umsetzung der Forderungen der BVT-Schlussfolgerungen erfolgt durch die seit 2023 in Kraft getretene NaGeMi-VwV (NaGeMi-VwV, 2024). Trotz weitgehender Übereinstimmung im Wortlaut mit der TA Luft 2021 (TA Luft, 2021) konkretisiert und spezifiziert die NaGeMi-VwV die geltenden Anforderungen und ist somit das maßgebliche Referenzdokument. Der Vollständigkeit halber werden aber beide Verwaltungsvorschriften betrachtet, die spezifischen Grenzwerte gegenübergestellt.

Spezifische Anforderungen für die Trocknung von Zuckerrübenschnitzeln umfassen (BVT Nahrungsmittel-, Getränke- und Milchindustrie, 2019):

- ▶ BVT 35 zur Steigerung der Energieeffizienz,
- ▶ BVT 36 zur Vermeidung oder Verminderung von Staubemissionen in die Luft,
- ▶ BVT 37 zur Verminderung von SO_x-Emissionen in die Luft aus der Hochtemperaturtrocknung.

Die folgende Übersicht listet diese Anforderungen kurz auf (BVT Nahrungsmittel-, Getränke- und Milchindustrie, 2019):

BVT-Schlussfolgerungen der Zuckerrübenschnitzeltrocknung

Steigerung der Energieeffizienz:

BVT 35b:

- ▶ Technik: Indirekte Trocknung (Verdampfungstrocknung) von Rübenschnitzeln mittels Heißdampfs.
- ▶ Anwendbarkeit: Möglicherweise nicht anwendbar bei bestehenden Anlagen aufgrund der Notwendigkeit eines vollständigen Umbaus der Energiezentrale.

BVT 35c:

- ▶ Technik: Solartrocknung von Rübenschnitzeln.
- ▶ Anwendbarkeit: Aufgrund der lokalen klimatischen Bedingungen und/oder Platzmangels möglicherweise nicht anwendbar.

BVT 35e:

- ▶ Technik: Niedrigtemperatur-(Vor-)Trocknung von Rübenschnitzeln.
- ▶ Anwendbarkeit: Allgemein anwendbar

Vermeidung oder Verminderung von Staubemissionen:

BVT 36:

- ▶ Technik: Verwendung gasförmiger Brennstoffe, Zyklon, Nasswäscher, Indirekte Trocknung, Solartrocknung, Niedrigtemperatur-Trocknung.
- ▶ Anwendbarkeit: Aufgrund von Einschränkungen im Zusammenhang mit der Verfügbarkeit gasförmiger Brennstoffe möglicherweise nicht anwendbar.

Verminderung von SO_x-Emissionen:

BVT 37:

- ▶ Technik: Verringerung von gefassten SO_x-Emissionen durch Hochtemperatur-Trocknung von Rübenschnitzeln (über 500 °C) mittels:
 - Verwendung von Erdgas
 - Nasswäscher
 - Verwendung von Brennstoffen mit niedrigem Schwefelgehalt
- ▶ Anwendbarkeit: Einschränkungen durch die Verfügbarkeit von Erdgas oder Notwendigkeit, dass kein Erdgas verfügbar ist.

Die BVT-Schlussfolgerungen zur Zuckerrübenschnitzeltrocknung umfassen verschiedene Techniken zur Energieeffizienzsteigerung und Emissionsminderung. Dazu gehört die indirekte Trocknung mittels Heißdampfs, Solartrocknung und Niedrigtemperatur-Trocknung, wobei die Anwendbarkeit je nach lokalen Bedingungen variiert. Zur Verminderung von Staubemissionen werden Techniken wie der Einsatz gasförmiger Brennstoffe und Nasswäscher empfohlen. Für die Reduktion von SO_x-Emissionen wird die Hochtemperatur-Trocknung mit Erdgas oder schwefelarmen Brennstoffen vorgeschlagen (BVT Nahrungsmittel-, Getränke- und Milchindustrie, 2019).

Spezifische Emissionswerte werden für BVT 36 (Staub) und BVT 37 wiedergegeben. Anzumerken ist, dass es sich bei der angegebenen Emissionsspanne jeweils um den Mittelwert über die Probennahmedauer handelt (BVT Nahrungsmittel-, Getränke- und Milchindustrie, 2019).

BVT-assoziierte Emissionswerte der Zuckerrübenschnitzeltrocknung

BVT 36: Vermeidung oder Verringerung von gefassten Staubemissionen:

- ▶ Staub: 5–100 mg/Nm³ bei 16 Volumenprozent Bezugssauerstoffgehalt.

BVT 37: Verringerung von gefassten SO_x-Emissionen:

- ▶ SO_x: 30–100 mg/Nm³ bei 16 Volumenprozent Bezugssauerstoffgehalt.

Für Stickoxide ist zu erwarten, dass die Emissionswerte am unteren Ende der Bandbreite liegen, wenn ausschließlich Biomasse als Brennstoff verwendet wird. Zudem ist festzuhalten, dass gemäß den angegebenen Referenzbedingungen für beide assoziierten Grenzwerte keine Korrektur des Wassergehaltes erfolgt, sie also auf das feuchte Abgas bezogen sind (BVT Nahrungsmittel-, Getränke- und Milchindustrie, 2019).

Entsprechend der BVT-Schlussfolgerungen fordern die TA Luft 2021 und die NaGeMi-VwV für die Zuckerrübenschnitzeltrocknungsanlagen, dass die Anlagen nach dem Stand der Technik der Indirektrocknung (Dampftrocknung) zu errichten sind oder gleichwertige Maßnahmen zur Emissionsminderung anzuwenden sind. Auch bei wesentlichen Änderungen im Bereich der Trocknung oder Energiezentrale ist die Anwendung der Indirektrocknung unter dem Grundsatz der Verhältnismäßigkeit zu prüfen (NaGeMi-VwV, 2024; TA Luft, 2021).

Zur Messung und Überwachung dieses Trocknertyps ergänzt die NaGeMi-VwV bei Anlagen nach der Industrieemissions-Richtlinie folgendes (NaGeMi-VwV, 2024):

- ▶ Feinstaub PM₁₀ und PM_{2,5}:
 - Wiederkehrende Messungen mindestens einmal jährlich.
- ▶ Gesamtstaub:
 - Wiederkehrende Messungen mindestens einmal monatlich.
 - Reduzierung der Überwachung auf einmal jährlich möglich, wenn das 90-Perzentil den Emissionswert nicht überschreitet (nach VDI 2448 Blatt 2, basierend auf Messergebnissen der letzten vier Jahre).

Beide VwV's differenzieren nach den verschiedenen, zur Anwendung kommenden Trocknerbauarten und legen spezifische Grenzwerte fest:

- a) Verdampfungstrockner (Wirbelschichttrockner)

Beide VwV's legen für diese Trocknerbauart fest, dass die Massekonzentrationsbegrenzungen und Anforderungen nach Abschnitt 5.2.5 der TA Luft 2021 mit Ausnahme der organischen Stoffe der Klassen I und II gelten. Dies bedeutet, dass organische Stoffe im Abgas, ausgenommen staubförmige organische Stoffe, den Massenstrom von 0,50 kg/h oder die Massenkonzentration von 50 mg/m³, wie in Tabelle 22 aufgeführt, nicht überschreiten dürfen. Für Abgase thermischer oder katalytischer Nachverbrennungseinrichtungen sowie sonstige gleichwertige Maßnahmen zur Emissionsminderung gelten strengere Grenzwerte⁴. Darüber hinaus sind Emissionsminderungen für organische Stoffe durch primärseitige Maßnahmen oder andere dem Stand der Technik entsprechende Verfahren zu erreichen (NaGeMi-VwV, 2024; TA Luft, 2021).

Tabelle 22: Emissionsgrenzwerte (GW) im Abgas von Verdampfungstrocknern für Zuckerrübenschnitzel

Emission	GW TA Luft 2021	GW NaGeMi-VwV
Organische Emissionen, angegeben als Gesamtkohlenstoff	0,50 mg/m ³	Bezug auf TA Luft
Acetaldehyd	Keine Betrachtung	30 mg/m ³ *

* Es liegt keine Angabe vor, ob sich die Werte auf feuchtes oder trockenes Abgas beziehen.

Zu beachten ist, dass das aus dem Trockengut ausgetriebene Wasser in die Atmosphäre abgegeben wird und bei der Indirekttrocknung direkt oder indirekt als Abwasser anfällt (Geschäftsführung Fachverband A Zuckerindustrie, Persönliche Mitteilung, 10. September 2020). Die im November 2023 veröffentlichte NaGeMi-VwV legt fest, dass für Acetaldehyd im Abgas eine Obergrenze von 30 mg/m³ einzuhalten und ein Zielwert von 15 mg/m³ anzustreben ist (NaGeMi-VwV, 2024). Trotz bereits umgesetzter bekannter Maßnahmen zur Emissionsminderung ist die Einhaltung des Grenzwerts von 30 mg/m³ für Verdampfungstrocknungsanlagen nach dem aktuellen Stand der Technik jedoch nicht gewährleistet. Bis zum Ablauf der Umsetzungsfrist am 23. November 2028 müssen die Ursachen in Zusammenarbeit mit den staatlichen Stellen fachlich untersucht und eine umsetzbare Lösung (primäre oder sekundäre Maßnahmen) entwickelt werden (Mitarbeiter:in 1 Bundesbehörde A., Persönliche Mitteilung, 11. November 2024). Eine detaillierte Betrachtung der Grenzwerte für Acetaldehyd ist in dieser Studie nicht enthalten, da der Stoff nicht im Fokus steht.

b) Verdunstungstrockner (Trommeltrockner, Hochtemperatur)

Die Trommeleintrittstemperatur darf zur Emissionsminderung an Geruchsstoffen 750 °C nicht überschreiten. Bei wesentlichen Änderungen der Anlage ist zu prüfen, ob die Indirekttrocknung gefordert werden kann. Die Emissionswerte, zusammengefasst in Tabelle 23, beziehen sich auf einen Volumengehalt an Sauerstoff im Abgas von zwölf Prozent (NaGeMi-VwV, 2024; TA Luft, 2021).

Tabelle 23: Emissionsgrenzwerte im Abgas von Hochtemperatur-Verdunstungstrocknern für Zuckerrübenschnitzel

Emission	GW TA Luft 2021	GW NaGeMi-VwV
Staubförmige Emissionen, angegeben als Gesamtstaub	0,05 g/m ³ (f)	0,05 g/m ³ (f)
Schwefeldioxid & Schwefeltrioxid, angegeben als Schwefeldioxid	0,55 g/m ³ *	0,18 g/m ³ (f)

⁴ Da die einzelnen Anforderungen der Trockner im Laufe des Projektes nicht erarbeitet werden konnten, lässt sich dieser Punkt nicht detaillierter ausführen.

Emission	GW TA Luft 2021	GW NaGeMi-VwV
Stickstoffmonoxid & Stickstoffdioxid, angegeben als Stickstoffdioxid	0,40 g/m ^{3*}	0,40 g/m ^{3*}
Organische Emissionen, angegeben als Gesamtkohlenstoff**	0,08 kg je Mg verarbeitete Rüben	0,08 kg je Mg verarbeitete Rüben
Formaldehyd	0,015 g/m ³	0,015 g/m ^{3*}
Acetaldehyd	Keine Betrachtung	30 mg/m ^{3*}

* Es liegt keine Angabe vor, ob sich die Werte auf feuchtes oder trockenes Abgas beziehen.

** Dieser Emissionswert betrifft organische Stoffe, erfasst durch Kieselgel und wird als Gesamtkohlenstoff angegeben. Messungen nach dem FID-Verfahren sind umzurechnen. Maßnahmen zur Emissionsminderung sind auszuschöpfen. Anforderungen der Nummer 5.2.5 für Klassen I und II gelten nicht.

Zur Messung und Überwachung dieses Trocknertyps ergänzt die NaGeMi-VwV bei Anlagen nach der Industrieemissions-Richtlinie folgendes (NaGeMi-VwV, 2024):

- Organische Stoffe, Stickstoffoxide und Kohlenmonoxid:
 - wiederkehrende Messungen mindestens einmal jährlich
- Schwefeloxide:
 - bei der Trocknung von Rübenschnitzeln ohne Erdgas Messung mindestens zweimal jährlich
 - Reduzierung der Überwachung auf einmal jährlich möglich, wenn das 90-Perzentil den Emissionswert nicht überschreitet (nach VDI 2448 Blatt 2, basierend auf Messergebnissen der letzten vier Jahre).

Eine kontinuierliche Messung von Ammoniak ist nicht zwingend, sondern kann nach TA Luft 2021 durch jährliche Einzelmessungen ersetzt werden (NaGeMi-VwV, 2024; TA Luft, 2021).

c) Verdunstungstrockner (Bandtrockner, Niedertemperatur)

Während für die staubförmigen Emissionen, wie in Tabelle 24 dargestellt, ein separater Grenzwert gilt, sind die organischen Emissionen aufgrund der ausschließlichen Kombination von Niedertemperatur- und Hochtemperaturtrocknung gemeinsam zu betrachten (NaGeMi-VwV, 2024; TA Luft, 2021).

Tabelle 24: Emissionsgrenzwerte im Abgas von Niedertemperatur-Verdunstungstrocknern für Zuckerrübenschnitzel

Emission	GW TA Luft 2021	GW NaGeMi-VwV
Staubförmige Emissionen, angegeben als Gesamtstaub	0,01 g/m ³ (f)	0,01 g/m ³ (f)
Organische Emissionen, angegeben als Gesamtkohlenstoff	Gemeinsame Betrachtung mit Hochtemperatur-Verdunstungstrockner	Wortgleiche Übereinstimmung

4.8.2 Abgasströme und Abgaslasten der Zuckerrübenschnitzeltrocknung

a) Verdampfungstrockner (Wirbelschichttrockner)

Laut VDI 2594 setzt sich das Rohgas des bei der Kondensation aus dem Verdampfungstrockner abgezogenen Brüden aus folgenden Komponenten zusammen: 76–265 mg/m³ (tr) Gesamtstaub, 14200–22100 mg/m³ (tr) Gesamtkohlenstoff (Silikagel + Kondensat), 250–410 mg/m³ (tr) Kohlenmonoxid, 140–1630 mg/m³ (tr) Essigsäure, 42–160 mg/m³ (tr) Ameisensäure, 810–2100 mg/m³ (tr) Aldehyde (Summe aus Formaldehyd, Acetaldehyd, Acrolein und Furfural) (VDI, 2015, September). Diese Werte wurden anhand von fünf Messungen an zwei verschiedenen Standorten mit repräsentativen Pressschnitzelmengen ermittelt (VDI, 2015, September).

b) Verdunstungstrockner (Trommeltrockner, Hochtemperatur)

Die VDI 2594 gibt für bestehende HTT-Verdunstungstrockner ermittelte Gesamtstaubgehalte zwischen 55 mg/m³(f) und 75 mg/m³(f) an (VDI, 2015, September). Die einzige im BVT-Merkblatt gelistete deutsche Anlage (Nasswäscher, zentraler Schornstein, zwei Hochtemperaturtrockner, Erdgas, Braunkohle, Nassgas-Zyklonstufe davor) weist 38,5 mg/m³ Gesamtstaub-Emissionen auf. Die Schwankungsbreite der angegebenen Messwerte weiterer Anlagen im europäischen Ausland ist mit 7–265 mg/m³ hoch (Santonja et al., 2019). An anderer Stelle des Dokuments wird allerdings eine Spanne von 50– 60 mg/Nm³ (gemessen unter Referenzbedingungen) angegeben (Santonja et al., 2019).

Bei Gesamtkohlenstoff (dort TVOC) gibt das BVT-Merkblatt Messwerte zwischen 181–235 mg/m³ (bei 13 / 16 Volumenprozent O₂) an (Santonja et al., 2019), wobei die Anlagenliste keine Anlage aus Deutschland enthält (Daten aus Frankreich). Die VDI 2594 gibt keine konkreten Messwerte für Hochtemperaturtrommeltrocknung an, weist aber auf verschiedene Einflussfaktoren wie die Zusammensetzung des Trockenguts, Trocknungsbedingungen und Trockensubstanzgehalte hin (VDI, 2015, September). Für den typischen Temperaturbereich von 350 °C bis weniger als 700 °C Trommeleintrittstemperatur schwankt die Gesamtkohlenstoffkonzentration zwischen 50 und 600 mg/m³ (keine Angabe der Bezugsgröße) (VDI, 2015, September). Davon sind laut VDI 2594 insgesamt etwa 20 bis 30 % Ameisensäure, Formaldehyd, Acetaldehyd, Butenal (Acrolein) und Furaldehyd (Furfural) (VDI, 2015, September).

Bezüglich Ammoniakgehalt erwähnt lediglich bereits genannte Publikation von Freudenberg (Freudenberg, 2008) einen Messwert von 11 mg/m³ im Gesamtbrüden der Schnitzeltrocknungsanlage bei Zugabe zum Rauchgas und auf 12 mg/m³ durch Zugabe in die Brennkammer des Trommeltrockners 2. Weitere Emissionsdaten waren im Rahmen der Studie nicht zu recherchieren.

In Bezug auf Feuerungsabgase, die bei direkt beheizten Trocknern die Trommel durchströmen, konstatiert die VDI 2594, dass wegen stetiger Brennoptimierung Kohlenmonoxidgehalte (CO) unbedeutend sind und typischerweise unter 50 mg/m³ (bei 10 Volumenprozent O₂) liegen (VDI, 2015, September). Höhere CO-Gehalte sind demnach ein Hinweis auf thermische Zersetzung des Trocknungsmaterials (VDI, 2015, September). Das BVT-Merkblatt berichtet von keinerlei Minderungs- und weist Emissionsdaten (gemischt, nass und trocken) in einer Spanne von 0 bis etwa 1600 mg/m³ aus (Santonja et al., 2019).

Stickstoffoxidemissionen korrelieren gemäß VDI 2594 mit dem eingesetzten Brennstoff (VDI, 2015, September). Bei Schweröl liegen sie zwischen 250 mg/m³ und 420 mg/m³ bei 7–10 Volumenprozent Rest-O₂, während sie bei Erdgas zwischen 65 mg/m³ und 160 mg/m³ bei 6–10 Volumenprozent Rest-O₂ dokumentiert sind (VDI, 2015, September). Mischfeuerungen weisen entsprechend dazwischenliegende Werte auf. Das BVT-Merkblatt berichtet von keiner Minderungs- und zeigt Emissionsdaten von nahe 0 bis über 350 mg/m³ (Santonja et al., 2019). In fünf deutschen Zuckerproduktionsanlagen mit Erdgas lag der durchschnittliche NO_x-Gehalt bei etwa 70 mg/Nm³, in zwölf Anlagen mit Schweröl bei etwa 270 mg/Nm³ (Santonja et al., 2019).

Schwefeloxidemissionen (SO_x) sind ebenfalls brennstoffabhängig. Bei Sauerstoffgehalten von 6% bis 10% liegen SO_x -Emissionen bei Schweröl zwischen 65 mg/m^3 und 160 mg/m^3 , während sie bei Erdgas unter 5 mg/m^3 liegen. Auch Kohlefeuerungen überschreiten diese Werte nicht (VDI, 2015, September).

c) Verdunstungstrockner (Bandtrockner, Niedertemperatur)

Gesamtstaubgehalte für die Niedertemperaturtrocknung von Rübenschnitzeln sind nicht angegeben. Das BVT-Merkblatt nennt eine Anlage (Anlage Nr. 112, Rain) mit Staubemissionen zwischen $1,9 \text{ mg/Nm}^3$ und $7,2 \text{ mg/Nm}^3$ (f) (Santonja et al., 2019). Diese Werte erscheinen im Vergleich zu den Anforderungen der neuen TA Luft an die Staubmessung bei Niedertemperaturtrocknern als gering. Staubgehalte des Rohgases des abgezogenen Brüdenanteils von Verdunstungstrocknern liegen bei $2,6\text{--}9 \text{ mg/m}^3$ (f) (Gesamt-)Staub (VDI, 2015, September).

Emissionswerte von Gesamtkohlenstoff für das Abgas von Niedertemperaturtrocknern konnten nicht recherchiert werden, sind aber gemäß TA Luft auch gemeinsam mit dem stets nachgeschalteten Trommeltrockner zu erfassen.

4.9 Hemmnisse für kontinuierliche Emissionsüberwachung bei der Trocknung von Zuckerrübenschnitzeln

Die Abgase der Verdunstungstrockner von Schnitzeltrocknern sind ähnlich zusammengesetzt wie die Abgase der Holzwerkstoffindustrie. Bei Trommelaustrittstemperaturen von etwa 100°C gibt es Feuchtebeladungen von 150 g/m^3 (tr) bis 400 g/m^3 (tr) bei hohen Frachten an organischen Stoffen (VDI, 2015, September). Eine Untersuchung⁵ vergleicht Euro-FID, das Silicagelverfahren und ein modifiziertes FID-Messverfahren mit vorgeschalteter Kondensatabscheidung für Einzelmessungen. Die kontinuierliche Messung mit Euro-FID zeigte Probleme mit der Verharzung des Messgasstrangs und erreichte trotz erheblichem Wartungsaufwand nicht die geforderte Verfügbarkeit von 95 %. Eine Kalibrierung war praktisch nicht möglich, da das Silicagelverfahren formal nicht an solchen Quellen einsetzbar ist und eine nasschemische Bestimmung der Einzelstoffe zu aufwendig und nicht repräsentativ für die gesamte Betriebszeit ist. Das modifizierte FID-Messverfahren mit Kondensatabscheidung und separater Analyse wurde vom Umweltbundesamt für die Überwachung des Gesamtkohlenstoff-Grenzwertes an Zuckerrübenschnitzeltrocknungsanlagen akzeptiert.

4.10 Potentiale der Emissionsminderung bei der Zuckerrübenschnitzeltrocknung

Die TA Luft 2021 fasst unter 5.4.7.24 zusammen, dass zur Emissionsminderung Anlagen zur Zuckerrübenschnitzeltrocknung nach der Technik der Indirektrocknung (Verdampfungstrocknung) zu errichten oder gleichwertige Maßnahmen anzuwenden sind (TA Luft, 2021). Ebenso ist bei wesentlichen Änderungen an der Energieversorgung zu prüfen, ob ein Umbau auf Indirektrocknung erfolgen kann (Santonja et al., 2019).

Gemäß BVT-Merkblatt sind dies unter anderem die Verwendung gasförmiger Brennstoffe, Zyklogen, Nasswäscher sowie die Niedrigtemperatur-(Vor-)Trocknung von Rübenschnitzeln (Santonja et al., 2019). Die Solartrocknung von Rübenschnitzeln wird für Deutschland als ungeeignet angesehen. Zur Verringerung von SO_x -Emissionen sind der Einsatz von Erdgas, Nasswäschern oder Brennstoffen mit niedrigem Schwefelgehalt empfohlen (Santonja et al., 2019).

⁵ „Messbericht über den Einsatz zweier Analysatoren vom Typ Euro-FID für die kontinuierliche Überwachung der Emissionen von organisch gebundenem Kohlenstoff im Abgas der Schnitzeltrocknungsanlagen zweier Zuckerfabriken“ vom 06.09.2004

Maßnahmen zur Senkung der Trocknungstemperatur bewirken tendenziell niedrigere Emissionen an organischen Stoffen und stellen, wie die anzustrebende hohe mechanische Abpressung der Rübenschnitzel, eine wirksame Emissionsminderungsmaßnahme dar (Santonja et al., 2019; VDI, 2015, September).

Laut der zugehörigen Richtlinie VDI 2594 sind bei Einsatz von Abgaswäschern Minderungsraten für organische Stoffe von 40% bis 60% bei üblichen pH-Werten im Waschmedium (4–6) realistisch. Die Richtlinie geht jedoch nicht auf die nötige Waschwasseraufbereitung und Wasserverluste ein. Bei Verdampfungstrocknern ist die Einbindung des Abgases in die Verbrennungsluftzufuhr der installierten Kesselanlagen möglich, sodass keine trocknungsbedingten Emissionen mehr auftreten (VDI, 2015, September).

Sofern ökonomisch vertretbar und technisch umsetzbar, scheint den Autoren der Studie ferner der Einsatz von Abgasbehandlungstechnik aus anderen Branchen mit vergleichbaren Abgasen, beispielsweise der Holzwerkstoffindustrie, denkbar. So ist theoretisch der Einsatz von Gewebefiltern hinter Niedertemperaturtrocknern zur Staubabscheidung möglich. Ferner sind Elektrofilter im trockenen Abgas und Nass-Elektrofilter im feuchten Abgas vorstellbar. Untersuchungen oder Referenzanlagen konnten im Laufe der Studie jedoch nicht recherchiert werden.

4.11 Weiteres Optimierungspotential der Anlagen zur Zuckerrübenschnitzeltrocknung

Die im BVT-Merkblatt unter BVT 36 (BVT Nahrungsmittel-, Getränke- und Milchindustrie, 2019) angegebene Solartrocknung von Rübenschnitzel scheint wie erwähnt den Autoren der Studie sowie dem Fachverband (Geschäftsführung Fachverband A Zuckerindustrie, Persönliche Mitteilung, 10. September 2020) für Deutschland ungeeignet. Der Fachverband führt in einem Positionspapier jedoch aus, dass mit den ausgelaugten Zuckerrübenschnitzeln der deutschen Produktionsstätten genügend Substrat zur Deckung des gesamten Energiebedarfs verfügbar ist (Ricke-Herbig, 2021). Zur Erreichung einer treibhausgasneutralen Zuckerindustrie führten Gere et al. im Auftrag des VdZ eine Studie durch. Zu den darin betrachteten Technologien gehören die Verdampfungstrocknung sowie Biogasanlage und Biogasaufbereitung. Von den drei betrachtenden Treibhausgasneutralitätsszenarien weist das Biomasseszenario die höchsten kumulierten Einsparungen in Bezug auf die Emissionen auf (Geres et al., 2020), aber auch mit den höchsten kumulierten Investitionskosten einhergeht (Geres et al., 2020). Die Studie weist ferner darauf hin, dass es sich bei allen untersuchten Technologien (Mechanische Brüdenverdichtung / Verdampfungstrockner / Erdgas- oder Biomasse-KWK sowie Elektrokessel) um verfügbare Technologien handelt. Geres et al. schlussfolgern, dass die Umsetzbarkeit daher von den äußeren Rahmenbedingungen abhängt, aber auch ethische Komponenten wie einer etwaigen Verknappung an Futtermittel, welche respektive über Wirtschaftlichkeit oder generelle Vertretbarkeit entscheiden (Geres et al., 2020).

5 Literaturverzeichnis

Allgemeine Verwaltungsvorschrift Abfallbehandlungsanlagen (ABA-VwV), GMBI 2022 Nr. 4, S. 78 (2022).

https://www.verwaltungsvorschriften-im-internet.de/bsvwvbund_20012022_IGI25025010.htm

Allgemeine Verwaltungsvorschrift zur Reduzierung von Emissionen und anderer Umweltauswirkungen in der Nahrungsmittel-, Getränke- und Milchindustrie (NaGeMi – VwV), Bundesanzeiger 1 (2024).

Amman Group. (o.D.). *Was ist neu – und was kommt als nächstes – in der nachhaltigen Asphaltproduktion: Interview mit Hans-Friedrich Peters, Executive Vice President Anlagen Division von Ammann*. Zugriff am 27. Juni 2022, verfügbar unter <https://www.ammann.com/de/news-media/news/whats-new-and-whats-next-in-sustainable-asphalt-production>

asphaltsuisse (Hrsg.). (2023, 21. April). *Niedertemperaturasphalt* [Interview mit Christophe Rohr]. <https://asphaltsuisse.ch/2023/04/21/niedertemperaturasphalt/>

Asphalt-Thermo-Transporte GmbH. (2015, 12. Mai). *Unternehmenswebsite*. <http://www.asphalt-thermo-transporte.de/>

ATRO GmbH (Hrsg.). (2024, 25. Juli). *Verlustfreie Konservierung von Grünfutter! – ATRO.at: Futterveredelung*. <https://www.atro.at/beste-technologie-einsetzen/>

Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft. (Juli 2012). *Futtermittelblatt Rind: Gras-/Kleegrascobs Trockengrün*. https://www.lfl.bayern.de/mam/cms07/ite/dateien/grascobs_merkblatt.pdf

Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft. (2018, 23. Oktober). *Klee gras, Heu, Cobs, Luzerne 2018*. https://www.lfl.bayern.de/mam/cms07/ite/dateien/klee gras_heu_cobs_luzerne_2018.pdf

Bilitewski, B. (2021, 14. Juni). *Bewährte Verfahren zur kommunalen Abfallbewirtschaftung: Informationssammlung über Ansätze zur nachhaltigen Gestaltung der kommunalen Abfallbewirtschaftung und dafür geeignete Technologien und Ausrüstungen* (UBA-Texte 39/2018). INTECUS Dresden GmbH, Dresden. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/bewaehrte-verfahren-zur-kommunalen-0>

Bresegarder Agro Service & Handels GmbH (Hrsg.). (2024, 25. Juli). *Trockengrün*. <https://www.bresegarder-as.de/trockengruen/>

Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Immissionsschutz (Hrsg.). (2019). *Bundeseinheitliche Vorgaben für die Parametrierung von Auswerteeinrichtungen für die kontinuierliche Gesamt-C-Überwachung bei Asphaltmischanlagen*. https://www.lai-immissionsschutz.de/documents/asphaltmischanlagen_bundeseinheitliches-parametrierungskonzept_1588684902.pdf

Bundeseinheitliche Praxis bei der Überwachung der Emissionen (BEP), GMBI 2017 Nr. 13/14, S. 234 (2017). https://www.verwaltungsvorschriften-im-internet.de/bsvwvbund_31072023_502500120230001.htm

Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG), BGBl. I 2013, 1274; zuletzt geändert durch Art. 1 des Gesetzes vom 8. April 2019, BGBl. I 2019, 432 (1974 & i.d.F.v. 2013). <https://www.gesetze-im-internet.de/bimschg/BImSchG.pdf>

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (Hrsg.). (2017). *Mechanisch-biologische Behandlung*. <https://www.bmuv.de/themen/kreislaufwirtschaft/abfallbehandlung-und-abfalltechnik/mechanisch-biologische-behandlung>

Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (Hrsg.). (2016, 13. Dezember). *Rundschreiben Straßenbau vom 13. Dezember 2016: Betr.: Maßnahmen zur Steigerung der Asphalteinbauqualität*. <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/StB/ars-aktuell/rundschreiben-strassenbau-2016-12-13.pdf>

Bürgerprotest Stadthäger Asphaltmischwerk e.V. (Hrsg.). (2022, 12. Juli). *Wie funktioniert ein Asphaltmischwerk?* Bürgerprotest Stadthäger Asphaltmischwerk e.V. <https://www.bi-stadthagen.de/hintergrundinformationen/wie-funktioniert-ein-asphaltmischwerk/>

Deutscher Asphaltverband (DAV) e.V. (Hrsg.). (2022, 27. Juni). *Asphaltmischwerk*. <https://www.asphalt.de/service/basics/vom-oel-zum-asphalt/asphaltmischwerk/>

Deutscher Asphaltverband e.V. (Hrsg.). (2014). *Wiederverwenden von Asphalt*. Überarbeitung 2014. https://www.asphalt.de/fileadmin/user_upload/downloads/dav/wiederverwenden_2014.pdf

Deutscher Fachverlag GmbH (Hrsg.). (2022, 30. Mai). *Geelen Counterflow: Elektrischer Trockner spart viel Energie*. agrarzeitung + FeedMagazine/Kraftfutter. <https://www.agrarzeitung.de/feedmagazine-kraftfutter/feedmagazine-nachrichten/geelen-counterflow-elektrischer-trockner-spart-viel-energie-101511>

Dornbusch, H.-J., Hannes, L., Santjer, M., Böhm, C., Wüst, S., Zwisele, B., Kern, M., Siepenkothen, H.-J. & Kant-hak, M. (2020). *Vergleichende Analyse von Siedlungsrestabfällen aus repräsentativen Regionen in Deutschland zur Bestimmung des Anteils an Problemstoffen und verwertbaren Materialien* [online] (Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt. Texte | 113/2020). <https://doi.org/10.60810/openumwelt-7085>

Durchführungsbeschluss (EU) 2018/1147 der Kommission - vom 10. August 2018 - über Schlussfolgerungen zu den besten verfügbaren Techniken (BVT) gemäß der Richtlinie 2010/75/EU des Europäischen Parlaments und des Rates für die Abfallbehandlung - (Bekannt gegeben unter Aktenzeichen C(2018) 5070), ABl. L 208 vom 17.8.2018, S. 38–90 (2018). http://data.europa.eu/eli/dec_impl/2018/1147/oj

Durchführungsbeschluss (EU) 2019/2031 der Kommission über Schlussfolgerungen zu den besten verfügbaren Techniken (BVT) gemäß der Richtlinie 2010/75/EU des Europäischen Parlaments und des Rates für die Nahrungsmittel-, Getränke- und Milchindustrie (Bekannt gegeben unter Aktenzeichen C(2019) 7989), ABl. L 313 vom 4.12.2019, S. 60–93 (2019). <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32019D2031>

Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft – TA Luft) vom 18. August 2021, GMBI 2021 Nr. 48-54, S. 1050 (2021). https://www.verwaltungsvorschriften-im-internet.de/bsvwvbund_18082021_IGI25025005.htm

European Asphalt Pavement Association (Hrsg.). (2022, 28. April). *Asphalt in Figures 2020: key figures of the European asphalt industry* (Asphalt in Figures Nr. 2020). <https://eapa.org/asphalt-in-figures/>

European Commission: Joint Research Centre, Pinasseau, A., Zenger, B., Roth, J., Canova, M. & Roudier, S. (2018). *Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Waste treatment/Industrial Emissions Directive 2010/75/EU (Integrated Pollution Prevention and Control)* (BREF EUR 29362 EN). Publications Office of the European Union. <https://doi.org/10.2760/407967>

Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen. (2013). *Zusätzliche technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Verkehrsflächenbefestigungen aus Asphalt: ZTV Asphalt-StB 07/13* (Ausg. 2007, Fassung 2013). FGSV-Verlag.

Freudenberg, T. (2008). Carbonatationsbrüdenverbrennung in der Trocknung im Werk Wabern der Südzucker AG. *Sugar Industry*, 133(1), 9–12. <https://sugarindustry.info/paper/10005299/>

Frommel, V. (2021, 26. April). *Dr. Carsten Karcher über Nachhaltigkeit des Baustoffs Asphalt - infraTest*. https://inftratest.net/karcher_nachhaltiger-einsatz-baustoff-asphalt/

Futtermittelverordnung (FuttMV), BGBl. I 2004; zuletzt geändert durch BGBl. I 2018, 1219 (1981/2016). https://www.gesetze-im-internet.de/futtmv_1981/FuttMV_1981.pdf

Geres, R., Mühlpointner, T. & Weigert, S. (2020, 1. Dezember). *Roadmap treibhausgasneutrale Zuckerindustrie in Deutschland: Pfade zur Klimaneutralität 2050*. Eine Studie für den Verein der Zuckerindustrie e.V. (VdZ). Fu-

tureCamp Climate GmbH. <https://future-camp.de/de/publikationen/FutureCamp-Roadmap-treibhausgasneutrale-Zuckerindustrie-2050.pdf>

Gesetz über den Handel mit Berechtigungen zur Emission von Treibhausgasen (Treibhausgas-Emissionshandels-gesetz - TEHG), BGBl. I S. 1578 (2004 & i.d.F.v. 2019). https://www.gesetze-im-inter-net.de/tehg_2025/BJNR0460B0025.html

Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Ab-fällen (Kreislaufwirtschaftsgesetz - KrWG), BGBl. I S. 212 (2023). <https://www.gesetze-im-inter-net.de/krwg/KrWG.pdf>

Hecht, H. (2003, 12. Februar). *Stellungnahme zur Herstellung von Trockengrün, Stand: Februar 2003*. Arbeits-gruppe "Carry over unerwünschter Stoffe in Futtermitteln". <https://www.bmel.de/DE/themen/tiere/futtermittel/ag-carry-over-trockengruen.html>

Hinrichs, B. (2023, 29. März). *BMDV und Asphaltbranche wollen nur noch NTA ab 2025*. B_I baumagazin. <https://bi-medien.de/fachzeitschriften/baumagazin/tiefbau-strassenbau/niedrigtemperaturasphalt-bmdv-und-asphaltbranche-wollen-nur-noch-nta-ab-2025-b15744>

hww Wienberg, W. (2005). *SVZ Verkauf perfekt - Ostdeutscher Abfallverwerter an die Sustec Schwarze Pumpe GmbH verkauft*. <https://www.rws-verlag.de/aktuell/newsticker-kanzleien/hww-wienberg-wilhelm-svz-verkauf-perfekt-ostdeutscher-abfallverwerter-an-die-sustec-schwarze-pumpe-gmbh-verkauft-17471/>

Informationsportal zur Abfallbewertung. (2019, 26. Juni). *Abfallsteckbrief "191210 Brennstoffe aus Abfällen"*. https://www.abfallbewertung.org/ipa/reppen.php?re-port=ipa&char_id=191210_Bre&lang_id=de&avv=&synon=&kapitel=7>active=

Ketelsen, K. & Becker, G. (2023). *Weiterentwicklung der mechanisch-biologischen Abfallbehandlung (MBA) mit den Zielen der Optimierung der Ressourceneffizienz und Minimierung von Treibhausgasemissionen* (Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt. Texte | 156/2023). <https://doi.org/10.60810/OPENUMWELT-6428>

Knoll, M. (2019). *Überprüfung der katalytischen Aktivität von keramischen Wabenkörpern an einem Modellgas und einem thermisch regenerativen Nachverbrennungsprozess* [Dissertation, Technische Universität Berlin]. DataCite. <https://www.depositonce.tu-berlin.de/handle/11303/8649>

Köhler, B., Wagner, K. & Beratungsteam Ökologischer Landbau. (2018). *Grüngut effizient trocknen und verarbeiten*. <https://ilh.hessen.de/unternehmen/technik-energie-und-bauen/gruengut-effizient-trocknen-und-verarbeiten/>

Kuss, K. (2019). *Thermo-Muldenkipper mit BMVI-Zertifizierung*. Krafthand-Truck. <https://www.kraft-hand.de/truck/artikel/thermo-muldenkipper-mit-bmvi-zertifizierung-24837/>

Lausitzer Rundschau. (2007, 11. Mai). *SVZ trennt sich von Abfallverwertung*. <https://www.lr-online.de/nachrichten/wirtschaft/svz-trennt-sich-von-abfallverwertung-35950018.html>

Lebensmittel-, Bedarfsgegenstände- und Futtermittelgesetzbuch (Lebensmittel- und Futtermittelgesetzbuch - LFGB), GBl. I 2013, 1426; zuletzt geändert durch Art. 1 des Gesetzes vom 24. April 2019, BGBl. I 2019, 498 (2013). <https://www.gesetze-im-internet.de/lfgb/LFGB.pdf>

Mansfeld, R., Barth, R., Beer, F., Breitbach, P., Gogolin, D., Pass, F., Radenberg, M., Riebesehl, G., Sadzulewsky, S. & Wölfle, H. (April 2009). *Temperaturabgesenkte Asphalte – Leitfaden: Ratschläge aus der Praxis für die Praxis*. https://www.asphalt.de/fileadmin/user_upload/umwelt/temperaturabgesenkte_asphalte.pdf

Martin, Brütting, Fehler, Liegl, Lichtnau, Breitzkreuz, Kordmann, Mair, Stöttner, Zell, Rössert, Kisielski & Buchberger. (2022, 27. Juni). *Verwertung von mineralischen Abfällen in Asphaltmischanlagen*. Stand September 2001. <https://www.lfu.bayern.de/luft/mustergutachten/index.htm>

Nehlsen AG (Hrsg.). (2021, 2. Mai). *MBS-Anlage zur Hausmüllaufbereitung*. <https://www.nehlsen.com/recycling-entsorgung/anlagen/mechanisch-biologische-stabilisierungsanlagen/>

Niederlausitz Aktuell. (2009, 9. Oktober). *Sustec Schwarze Pumpe meldet Insolvenz an - Geschäftsbetrieb bei Sustec geht weiter* [Quelle: möller pr GmbH]. <https://www.niederlausitz-aktuell.de/niederlausitz-aktuell/orte/spree-neisse/spremberg/schwarze-pumpe/7296/sustec-schwarze-pumpe-meldet.html>
<https://www.niederlausitz-aktuell.de/spree-neisse/spremberg/7296/sustec-schwarze-pumpe-meldet.html>

Nordzucker AG. (o.D.a). *Nordzucker - Clauen* [Webseite]. Zugriff am 11. Februar 2022, verfügbar unter <https://www.nordzucker.com/de/the-sugar-company/standorte/clauen/>

Nordzucker AG. (o.D.b). *Nordzucker - Nordstemmen* [Webseite]. Zugriff am 11. Februar 2022, verfügbar unter <https://www.nordzucker.com/de/the-sugar-company/standorte/nordstemmen/>

Nordzucker AG (Hrsg.). (2022). *Von der Rübe zum Zucker: Zuckerherstellung - Schritt für Schritt* [Produktbroschüre]. https://www.nordzucker.com/de/wp-content/uploads/sites/2/2020/08/NZ_Zuckerflyer_D_2022_online.pdf

Osteroth, D. (Hrsg.). (1991). *Taschenbuch für Lebensmittelchemiker und -technologen: Band 2*. Springer Berlin Heidelberg.

Pfeifer & Langen GmbH & Co. KG (Hrsg.). (2021). *Fest verwurzelt.: Nachhaltigkeit bei Pfeifer & Langen* [Produktbroschüre]. https://www.pfeifer-langen.com/wp-content/uploads/Nachhaltigkeitsbericht_PL_2021_DE.pdf

Platzk, S. (2018). *Entwicklung eines Prototyps zur dynamischen Fließschemasimulation von Prozessen der Aufbereitung gemischter Siedlungsabfälle* [Dissertation]. Technische Universität Berlin, Berlin. https://deposi-tonce.tu-berlin.de/bitstream/11303/7987/4/platzk_stefan.pdf

QS Qualität und Sicherheit GmbH (Hrsg.). (2020a, 1. Januar). *Anlage 8.2 Tabelle Höchstgehalte und QS-Richtwerte*. https://www.q-s.de/services/files/downloadcenter/1_anlagen/monitoringprogramm/fumimo/lf_fumimo_anl_8.2_frei_01012020_d.pdf

QS Qualität und Sicherheit GmbH (Hrsg.). (2020b, 1. Januar). *Leitfaden Futtermittelmonitoring: Qualitätssicherung. Vom Landwirt bis zur Ladentheke*. https://www.q-s.de/services/files/downloadcenter/4_leitfaeden/monitoringprogramme/futtermittelmonitoring/lf_fumimo_frei_01012020_d.pdf

Qualitätstrocknung Nordbayern eG. (o.D.). *Qualitätstrocknung Nordbayern eG – Trocknungsprozess*. Zugriff am 13. April 2022, verfügbar unter <https://qtn.de/herstellungsprozess/>

Richtlinie 2002/32/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 7. Mai 2002 über unerwünschte Stoffe in der Tierernährung, ABl. L 140 vom 30.5.2002, S. 10–22 (2002). https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:aca28b8c-bf9d-444f-b470-268f71df28fb.0002.02/DOC_1&format=PDF

Richtlinie 2010/75/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 24. November 2010 über Industrieemissionen (integrierte Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung) (Neufassung), ABl. L 334 vom 17.12.2010, S. 17–119 (2010). <http://data.europa.eu/eli/dir/2010/75/oj>

Ricke-Herbig, M. (2021). *Die klimapolitische Transformation und den Green Deal nicht ohne die Industrie im ländlichen Raum denken: Positionspapier* [03.11.2021]. https://www.zuckerverbaende.de/wp-content/uploads/2021/11/Position-VdZ_klimapolit-Transformation-nicht-ohne-Industrie-im-laendlichen-Raum_03112021.pdf

Roos, C. J. (2008 (rev. 2013)). *Biomass Drying and Dewatering for Clean Heat & Power*. Berichtsnummer: WSUEEP08-015. U.S. Department of Energy. <http://northwestchptap.org/NwChpDocs/BiomassDryingAndDewateringForCleanHeatAndPower.pdf>

Santonja, G. G., Karlis, P., Stubdrup, K. R. & Roudier, S. (2019). *Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Food, Drink and Milk Industries* (EUR 29978). European Commission, Joint Research Centre.

Schröter, A. (2018, 28. November). *Kontinuierliche C-Gesamt-Messung an Asphaltmischanlagen: Praxisbeispiele bei der Einführung und dem Betrieb*. Vortrag auf dem 8. Kolloquium BVT/Stand der Technik, Dresden, Deutschland. Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG). https://www.luft.sachsen.de/download/luft/LfULG_Kolloquium_Schroeter.pdf

Statistisches Bundesamt. (2024a, 8. Mai). *Statistischer Bericht - Abfallentsorgung 2022: EVAS-Nummer 32111* (Abfallwirtschaft). <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/Abfallwirtschaft/Publikationen/Downloads-Abfallwirtschaft/statistischer-bericht-abfallentsorgung-2190100227005.xlsx?blob=publicationFile>

Statistisches Bundesamt. (2024b, 24. Juni). *Statistischer Bericht - Abfallbilanz 2022: EVAS-Nummer 32171* (Abfallwirtschaft). <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/Abfallwirtschaft/Publikationen/Downloads-Abfallwirtschaft/statistischer-bericht-abfallbilanz-5321001227005.xlsx?blob=publicationFile>

Sutor-Fiedler, M. (2019). Daten aus Norwegen: Emissionsreduzierung bei der Asphaltherstellung. *Asphalt und Bitumen*, 2019(05). <https://amat-asphalt.de/downloads/emmissionsreduzierung.pdf>

Technische Regel für Gefahrstoffe 905: Verzeichnis krebserzeugender, keimzellmutagener oder reproduktionstoxischer Stoffe (TRGS 905), GMBI. 2016, 378–390 [Nr. 19], zuletzt geändert durch GMBI. 2021, 899 [Nr. 41] (2016). <https://www.baua.de/DE/Angebote/Regelwerk/TRGS/pdf/TRGS-905.pdf>

TRBA 214 "Anlagen zur Behandlung und Verwertung von Abfällen" (TRBA 214), GMBI 2018, Nr. 30 vom 3.7.2018 (2018). <https://www.baua.de/DE/Angebote/Regelwerk/TRBA/TRBA-214.html>

Trocknungswerk Donauaalthem GmbH (Hrsg.). (2024). *Grünfütterttrocknung*. <https://www.trocknungswerk-donauaalthem.com/gruenfutterttrocknung>

TU Braunschweig (Hrsg.). (2024, 3. April). *Straßenbau mit Bioasphalt: Presseinformation Forschungsprojekt NO-BIT*. <https://magazin.tu-braunschweig.de/pi-post/strassenbau-mit-bioasphalt/>

van Poel, P. W. (Hrsg.). (2000). *Zuckertechnologie: Rüben- und Rohrzuckergewinnung*. Bartens.

Verein Deutscher Ingenieure (VDI) (2006, Dezember). *Emissionsminderung - Anlagen zur mechanisch-biologischen Behandlung von Siedlungsabfällen* (VDI-Richtlinien 3475 Blatt 3). VDI Verlag.

Verein Deutscher Ingenieure (VDI) (2015, Oktober). *Emissionsminderung - Biologische Abfallbehandlungsanlagen - Vergärung und Nachbehandlung* (VDI-Richtlinien 3475 Blatt 5). VDI Verlag.

Verein Deutscher Ingenieure (VDI) (2015, September). *Emissionsminderung Schnitzeltrocknungsanlagen der Zuckerindustrie* (VDI Richtlinien 2594). VDI Verlag.

Verein Deutscher Ingenieure (VDI) (2021, Dezember). *Filternde Abscheider: Oberflächenfilter* (VDI Richtlinie 3677). VDI Verlag.

Verein Deutscher Ingenieure (VDI) (2023, Mai). *Emissionsminderung - Anlagen zur Herstellung von Asphaltmischgut* (VDI-Richtlinie 2283). VDI Verlag.

Verordnung (EG) Nr. 183/2005 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 12. Januar 2005 mit Vorschriften für die Futtermittelhygiene (Text von Bedeutung für den EWR), ABl. L 35 vom 8.2.2005, S. 1–22 (2005). <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32005R0183>

Verordnung (EG) Nr. 382/2005 der Kommission vom 7. März 2005 mit Durchführungsbestimmungen zur Verordnung (EG) Nr. 1786/2003 des Rates über die gemeinsame Marktorganisation für Trockenfutter, ABl. L 61 vom 8.3.2005, S. 4–19 (Nicht mehr in Kraft, Datum des Endes der Gültigkeit: 19/02/2016) (2005). <http://data.europa.eu/eli/reg/2005/382/oj>

Verordnung (EG) Nr. 767/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 13. Juli 2009 über das Inverkehrbringen und die Verwendung von Futtermitteln, zur Änderung der Verordnung (EG) Nr. 1831/2003 und zur Aufhebung der Richtlinien 79/373/EWG, 82/471/EWG, 83/228/EWG, 93/74/EWG, 93/113/EG und 96/25/EG so-

wie der Entscheidung 2004/217/EG (Text von Bedeutung für den EWR), ABl. L 229 vom 1.9.2009 (2009).
<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/ALL/?uri=CELEX:32009R0767>

Verordnung (EU) 2017/1017 der Kommission vom 15. Juni 2017 zur Änderung der Verordnung (EU) Nr. 68/2013 zum Katalog der Einzelfuttermittel, ABl. L 159 vom 21.6.2017, S. 48–119 (2017). <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/ALL/?uri=CELEX:32017R1017>

Verordnung (EU) 2023/915 der Kommission vom 25. April 2023 über Höchstgehalte für bestimmte Kontaminanten in Lebensmitteln und zur Aufhebung der Verordnung (EG) Nr. 1881/2006, ABl. L 119 vom 5.5.2023, S. 103–157 (2023). <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32023R0915&qid=1742221054795>

Verordnung (EU) Nr. 68/2013 der Kommission vom 16. Januar 2013 zum Katalog der Einzelfuttermittel, ABl. L 29 vom 30.1.2013, S. 1–64 (2013). <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32013R0068&qid=1742213824128>

Verordnung zum Schutz vor Gefahrstoffen (Gefahrstoffverordnung - GefStoffV), BGBl. I 2010, 1643, 1644; zuletzt geändert durch Art. 2 (21. Juli 2021), BGBl. I 2021, 3115 (2010 & i.d.F.v. 2021). <https://www.gesetze-im-internet.de/gefstoffv/>

Vierte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über genehmigungsbedürftige Anlagen – 4. BImSchV), BGBl. I S. 1440 (2017). https://www.gesetze-im-internet.de/bim-schv_4_2013/

Vögele, M. (2015, 26. Juni). *Herausforderungen der Futtertrocknungen in der Zukunft*. Trockengrün Marketing eG. Regionalkonferenz zu Europäischen Innovationspartnerschaften in der Landwirtschaft. https://fw-europa.com/fileadmin/Ulrike_Mueller/Aktuelles_Bilder/Bilder/Voegele_Matthias.pdf

Wikipedia-Autoren, s. V. (o.D.). *Mechanisch-biologische Abfallbehandlungsanlage*: Versions-ID der Seite: 193871103. https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Mechanisch-biologische_Abfallbehandlungsanlage&oldid=193871103

Wikipedia-Autoren, s. V. (2019, 30. Dezember). *Zuckerindustrie* [Versions-ID der Seite: 195335266]. <https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Zuckerindustrie&oldid=195335266>

Wikipedia-Autoren, s. V. (2021). *Zuckerrübenschnitzel* [Versions-ID der Seite: 216999532]. <https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Zuckerrübenschnitzel&oldid=216999532>

WIRTGEN GROUP. (o.D.). *Asphaltrecycling: Beim Asphaltrecycling muss die gesamte Prozesskette stimmen*. Zugriff am 28. Juli 2024, verfügbar unter <https://www.wirtgen-group.com/de-nl/news-und-media/wirtgen-group/asphaltrecycling/>

Wirtgen Group (Hrsg.). (2009, 2. April). *Stationäre Asphaltmischanlagen TYP BA / BA-RPP* [Produktbroschüre BENNINGHOVEN GmbH & Co. KG]. https://www.wirtgen-group.com/binary/full/o6671v95_Prospekt_Aspahltmischanlage_BA_D.pdf

Wirtgen Group (Hrsg.). (2019, 2. April). *Retrofit: Werterhaltend, Wettbewerbsfähig, Zeitgemäß* [Produktbroschüre]. https://www.wirtgen-group.com/binary/full/o18843v95_Retrofit_Brochure_DE.pdf

WIRTGEN GROUP (Hrsg.). (2022). *Heißgaserzeuger garantiert die Einhaltung der TA Luft-Emissionsgrenzwerte / PM / Benninghoven*. <https://www.wirtgen-group.com/de-de/news-und-media/benninghoven/heissgaserzeuger-emissionsgrenzwerte/>

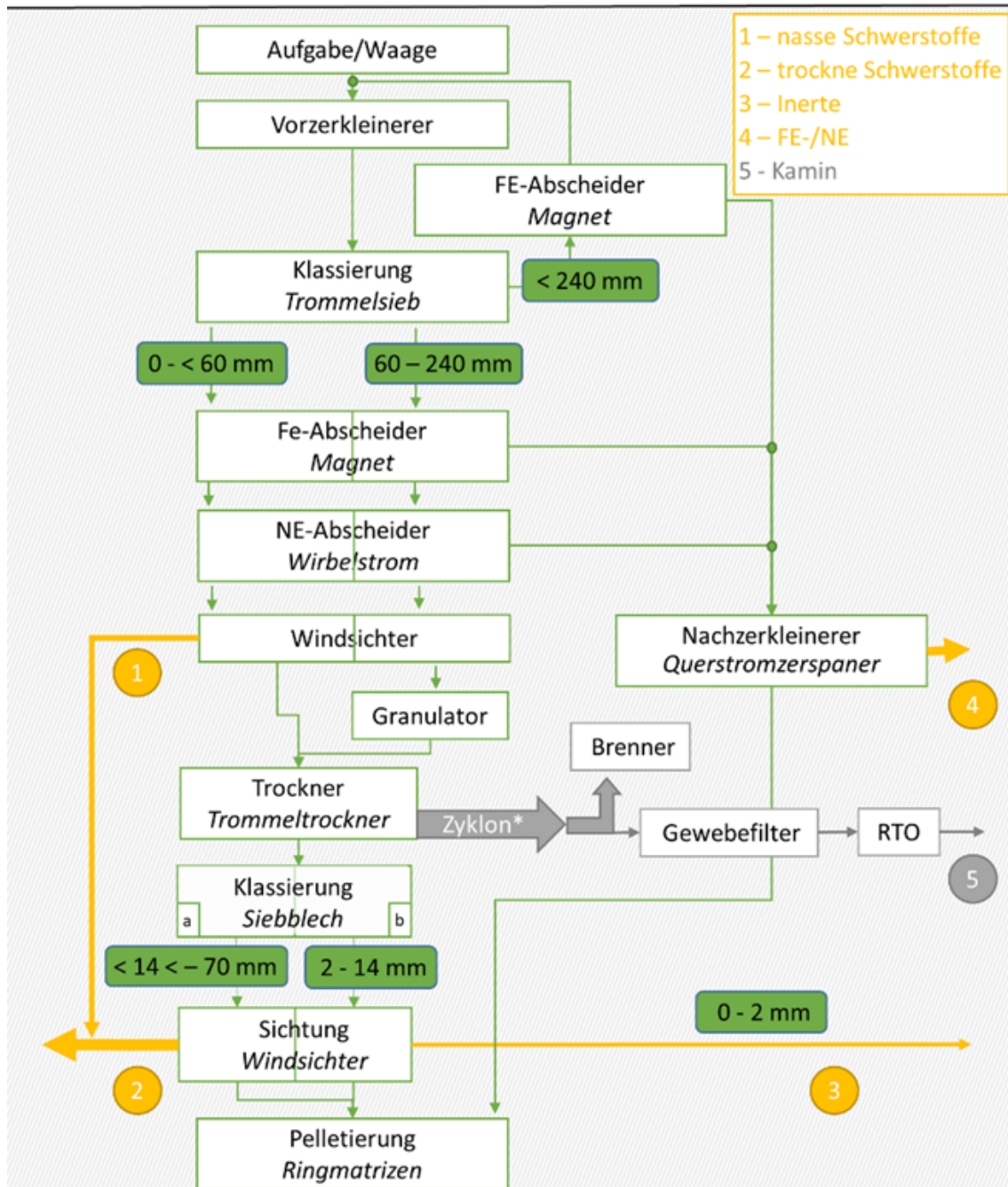
Wirtgen Group (Hrsg.). (2022, 6. Oktober). *Reduzierung des CO₂-Fußabdrucks in der Asphaltherstellung*. <https://press.lectura.de/de/article/reduzierung-des-co2-fussabdrucks-in-der-asphaltherstellung/59582>

Wirtschaftliche Vereinigung Zucker e. V. & Verein der Zuckerindustrie e. V. (Hrsg.). (2021). *Jahresbericht 2020/2021*. https://www.zuckerverbaende.de/wp-content/uploads/2021/06/WVZ_VdZ_Jahresbericht_2020-2021.pdf

Zwingli, U.-P. (2021, 27. April). *Niedertemperatur- Asphalt: die ökologische und leistungsstarke Alternative*. <https://derasphaltprofi.ch/niedertemperatur/>

A Anhang zum Abschnitt 1 (MPS-Anlagen)

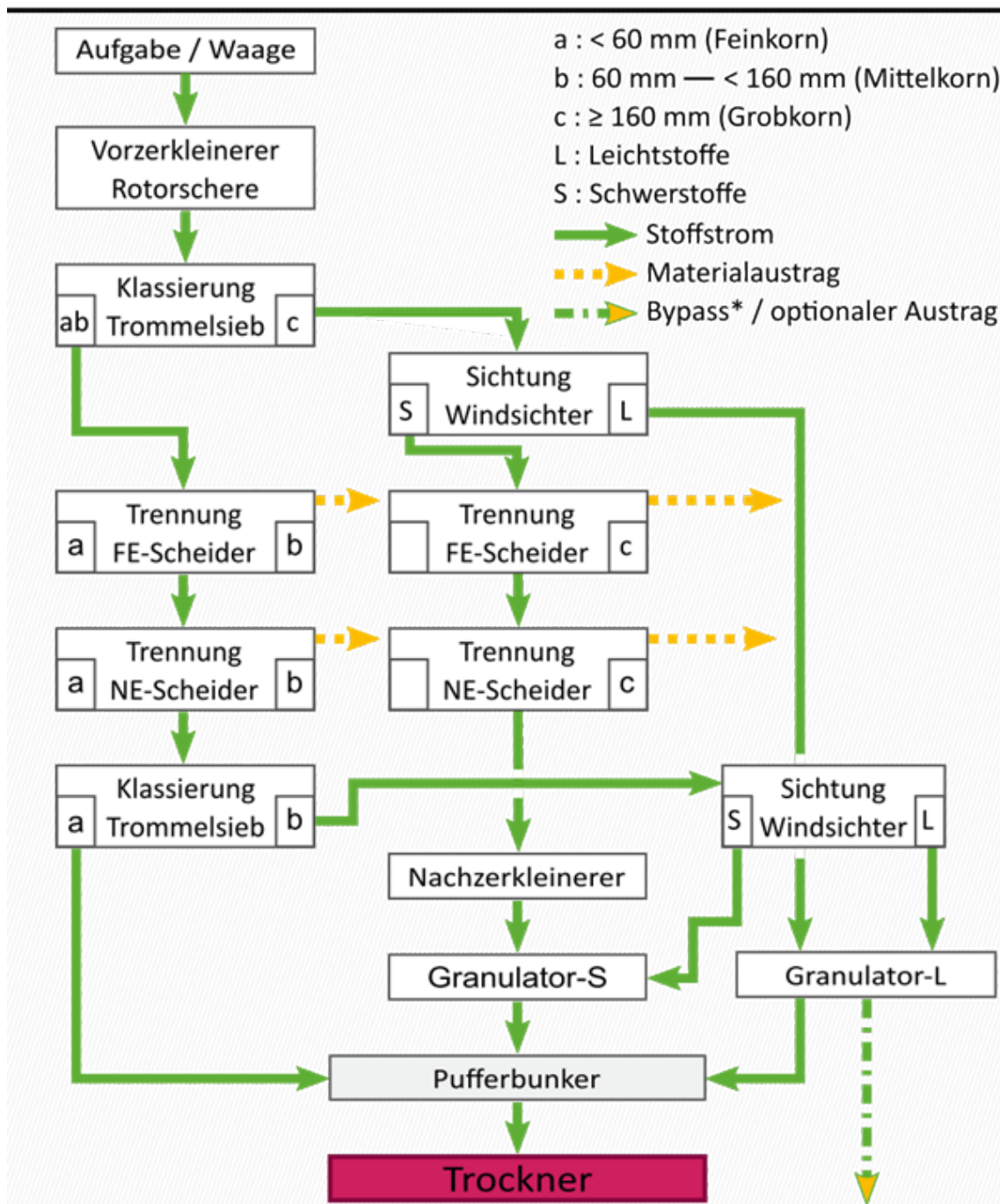
Abbildung 13: Verfahrensfließbild der MPS-Anlage 1 zur EBS-Herstellung



* 80 % Trocknerabluft als Brüden im Kreislauf über Zyklon, 20 % ausgeschleust über Gewebefilter und anschließend RTO

Quelle: eigene Darstellung, DBI-Gruppe 2021

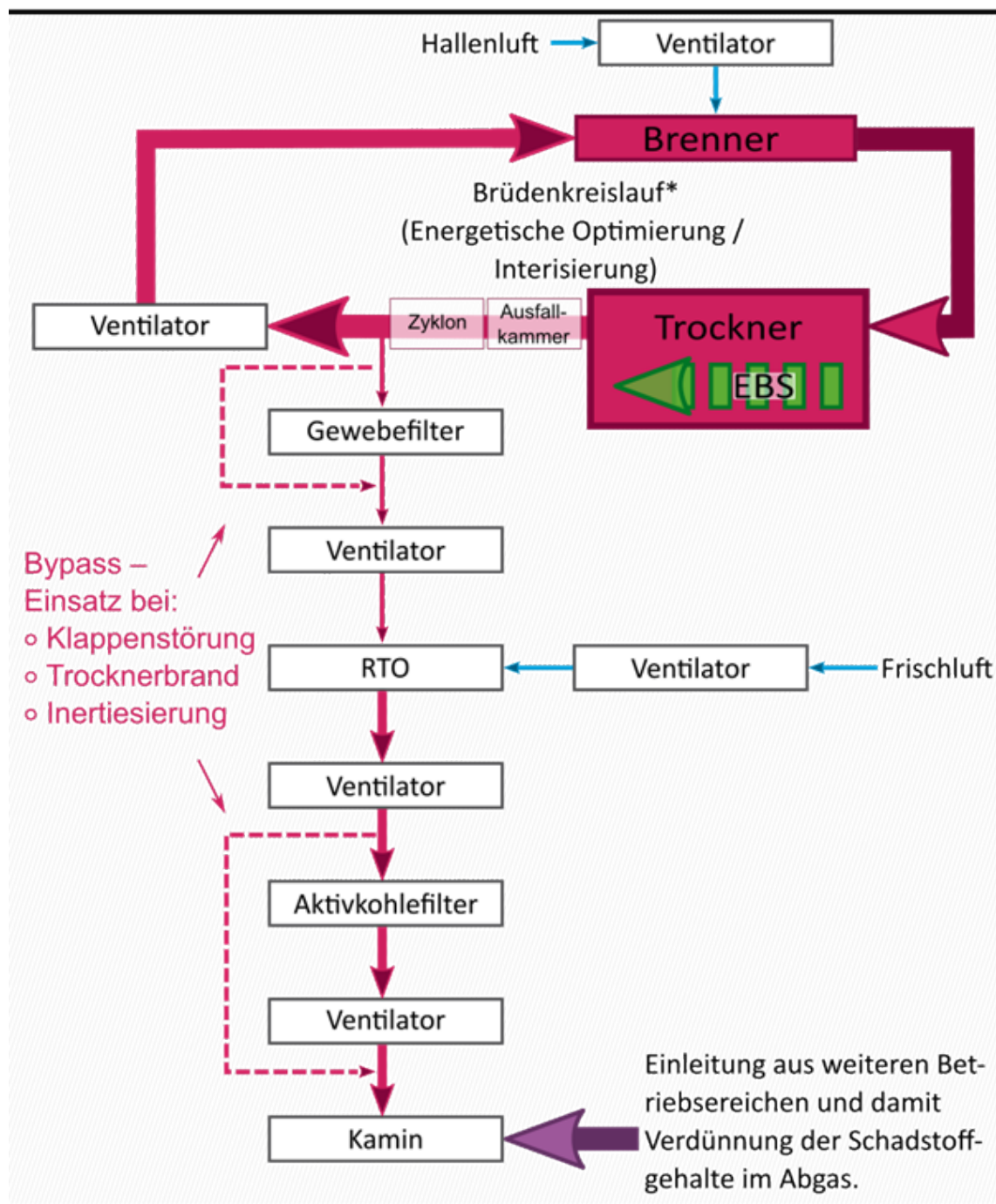
Abbildung 14: Verfahrensfließbild der MPS-Anlage 2 und 3 zur EBS-Herstellung



* Leichtgut eignet sich direkt als Sekundärbrennstoff, wird daher direkt entlang einer als Kunststoffeauschleusung bezeichneten Umfahrung der Konfektionierung zugeführt (Platzk, S. (31.01.2018)).

Quelle: eigene Darstellung, DBI-Gruppe 2021

Abbildung 15: Vereinfachtes Fließbild der relevanten Gasströme der MPS-Anlagen 2 und 3



*Circa 2/3 das Abgases werden im Kreis gefahren, d.h. 1/3 ausgeschleust.

Quelle: eigene Darstellung, DBI-Gruppe 2021

Tabelle 25: Zusammenfassung wesentlicher Anlagenkenndaten der MPS-Trockner

Anlage	MPS-1	MPS-2	MPS-3
Typ	Trommeltrockner	Trommeltrockner	Trommeltrockner
Anzahl	2 (Standard: Einzelbetrieb)		
Baujahr	2005	2006	2005
Hersteller	Vandenbroek (ANDRITZ)		
Länge	17 m	35	35
Durchmesser	3,7 m	3,5	3,5
Brenner	3x, extern, $\sum P_{th} = 7,4$ MW	1x, extern, $\sum P_{th} = 7,5$ MW	1, extern, $\sum P_{th} = 7,5$ MW
Brennstoff	Erdgas	Erdgas	Erdgas
Jahresverbrauch Erdgas	15Mio kWh		
Erdgasverbrauch	160 kWh/t		220 kWh/t*
Stromverbrauch	60 kWh/t	ca. 40-80kWh/t*	ca. 40-80kWh/t*
Gasvolumenstrom RTO	36.000 m ³ /h	37.150 m ³ /h	37.000
Strömungsführung	Gleichstrom	Gleichstrom	Gleichstrom
Brüdenrückführung	< 80 %	< 2x Gasvolumenstrom RTO	< 2x Gasvolumenstrom RTO
Restwärmenutzung	nein, BHKW vorgesehen	Nein	nein
Temperatur Ein-/Ausgang	360 / 105 °C	360 / 115 °C	360 / 115 °C
Verweilzeit	10 – 20 min	10 – 20 min	10 – 20 min
Gutsfeuchte Ausgang	35 – 18 %	35 – 18 %	35 – 18 %
Trocknungsleistung	5tH ₂ O / h	2,5-7tH ₂ O / h*	2,5-7tH ₂ O / h*
Führungsgröße	Temperatur Ausgang	Temperatur Ausgang	Temperatur Ausgang
Drehzahl	12		
Einzugsschaukeln	ja	ja	ja
Durchzugsschaukeln	ja	ja	ja
Wartungsintervall	Wöchentlich	14 täglich	14-tägig
Abgasnachbehandlung	Zyklon, Gewebefilter, RTO	Zyklon, Gewebefilter ^{a)} , RTO, Aktivkohlerfilter ^{a)} , Kamin	Zyklon, Gewebefilter ^{a)} , RTO, Aktivkohlerfilter ^{a)} , Kamin

a) Bypass, Einsatz bei Bedarf

B Anhang zum Abschnitt 2 (Asphaltmischanlagen)

Tabelle 26: Emissionsdaten von Asphaltmischanlagen nach Tabelle 4 VDI 2283.

		Ohne RC-Zugabe (nur Neumineral)						bis 40 % RC-Zugabe (typisch für Kaltzugabe)						> 40 % RC-Zugabe (typisch für Warmzugabe)					
Brennstoff		HEL		Gas		BKS		HEL		Gas		BKS		HEL		Gas		BKS	
Emissionskomponente	in mg/m ³	n	Mdn ¹⁾ [mg/m ³]	n	Mdn ¹⁾ [mg/m ³]	n	Mdn ¹⁾ [mg/m ³]	n	Mdn ¹⁾ [mg/m ³]	n	Mdn ¹⁾ [mg/m ³]	n	Mdn ¹⁾ [mg/m ³]	n	Mdn ¹⁾ [mg/m ³]	n	Mdn ¹⁾ [mg/m ³]	n	Mdn ¹⁾ [mg/m ³]
Org. Stoffe (Gesamt-C)	< 50	5		5		18		40		7		220		17		4		120	
	50...100	1	29	1	22	1	18	3	25	2	30	17	29	6	45	1	39	19	41
	> 100	0		0		0		0		0		1		1		0		1	
Benzol	< 1	3		3		15		26		6		123		13		2		47	
	1...2,5	2	0,4	1	0,1	2	0,2	4	0,2	1	0,1	47	0,5	7	0,8	3	1,3	32	0,8
	> 2,5	0		0		1		2		0		5		1		0		0	
1,3-Butadien	< 1	2		1		5		15		2		95		7		1		45	
	1...2,5	0	0,2	2	1,7	0	0,1	1	0,1	0	0,1	10	0,1	5	0,9	3	1,4	8	0,2
	> 2,5	0		0		0		1		1		1		1		0		0	
Σ Benzol & 1,3- Butadien ²⁾	< 1	1		1		4		15		3		84		4		1		34	
	1...2,5	1	1,3	1	1,8	1	0,5	3	0,5	0	0,5	42	0,6	4	2,1	0	3,2	43	1,1
	> 2,5	0		1		0		3		1		14		5		3		10	
FA ³⁾	< 1			0		1		10		1		23		0		1		3	
	1...5		-	1	1,2	5	2,2	11	1,7	1	11,8	34	1,2	4	5,1	0	0,7 ⁵⁾	28	4,33

	> 5			0		0		4		3		3		4		0		27	
CO	< 500	6		5		12		43		10		102		24		5		59	
	500...1000	0	170	0	210	7	457	1	83	0	70	124	500	1	166	0	157	77	500
	> 100	0		0		0		0		0		7		0		0		4	
Staub ⁴⁾	< 5	4		3		12		23		6		134		17		4		77	
	5...15	1	3	2	3	8	4	11	3	2	3	57	3	1	2	1	5	29	3
	> 15	1		1		1		7		1		41		6		0		31	
SO ₂	< 50	5		2		5		23		6		36		10		2		20	
	50...300	1	< 5	0	< 5	14	105	20	10	3	< 5	186	69	9	8	0	< 5	114	63
	> 300	0		0		0		0		0		0		0		0		1	
NO _x	< 100	6		5		1		40		10		5		24		4		7	
	100...300	0	43	0	25	17	199	2	47	0	39	214	210	1	44	1	34	124	190
	> 300	0		0		1		0		0		12		0		0		6	

Mdn Median

n Anzahl der Messwerte

1) bezogen auf einen Sauerstoffgehalt von 17 % Volumenanteil

2) Die Summenbildung für Benzol und 1,3-Butadien erfolgt nur für Messungen in denen Ergebnisse für beide Komponenten vorliegen. Sie kann deshalb nicht direkt aus der Summe der Einzelwerte nachvollzogen werden.

3) Messergebnisse für Formaldehyd stammen aus dem Zeitraum bis 2017

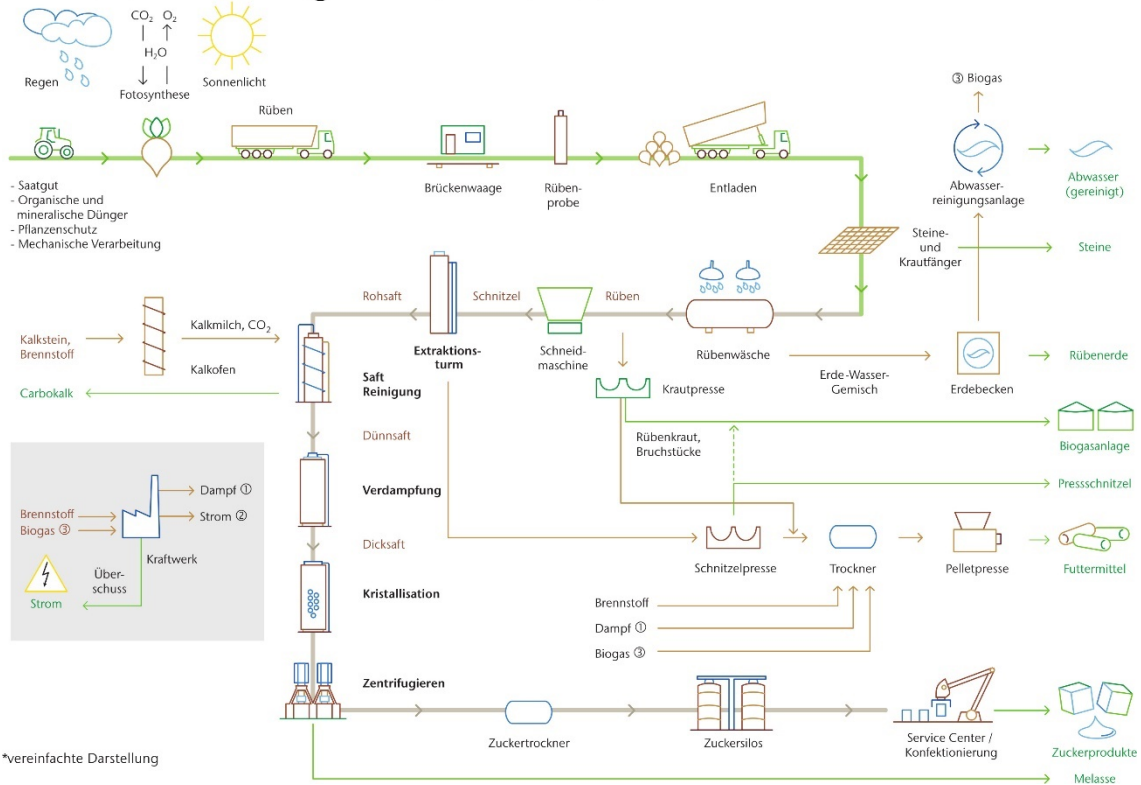
4) keine Umrechnung auf den Bezugssauerstoffgehalt bei O₂ < 17 % Volumenanteil

5) Für diesen Betriebszustand liegt ein weiteres Messergebnis (76,4 mg/m³) vor, dessen Repräsentativität aber zweifelhaft ist. Der Wert wurde bei der Auswertung nicht berücksichtigt.

C Anhang zum Abschnitt 4 (Zuckerrübenschnitzeltrocknung)

Abbildung 16: Schematische Darstellung der Zuckerherstellung

Die Zuckerherstellung – Schritt für Schritt*



Quelle: (Nordzucker AG, 2022)