

TEXTE

18/2019

# Stärkere Verankerung der Ressourceneffizienz und Abfallvermeidung in produktpolitischen Instrumenten

Abschlussbericht



TEXTE 18/2019

Umweltforschungsplan des  
Bundesministeriums für Umwelt,  
Naturschutz und nukleare Sicherheit

Forschungskennzahl 3714 95 3070  
UBA-FB 002766

## **Stärkere Verankerung der Ressourceneffizienz und Abfallvermeidung in produktpolitischen Instrumenten**

Abschlussbericht

von


Christian Clemm, Prof. Dr.-Ing. Dr. sc. techn. Klaus-Dieter Lang  
Technische Universität Berlin, Berlin

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

# Impressum

**Herausgeber:**

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

 /umweltbundesamt.de

 /umweltbundesamt

**Durchführung der Studie:**

Technische Universität Berlin  
Fakultät IV - Elektrotechnik und Informatik  
Forschungsschwerpunkt Technologien der Mikroperipherik  
Fachgebiet Mikroelektronik - Aufbau- und Verbindungstechniken  
Gustav-Meyer-Allee 25  
13355 Berlin

**Abschlussdatum:**

Juli 2018

**Redaktion:**

Fachgebiet III 1.3 Ökodesign, Umweltkennzeichnung und Umweltfreundliche  
Beschaffung  
Dr. Ines Oehme

Publikationen als pdf:

<http://www.umweltbundesamt.de/publikationen>

ISSN 1862-4804

Dessau-Roßlau, März 2019

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

## **Kurzbeschreibung**

Mit Blick auf den Rohstoffeinsatz und die erheblichen Aufwendungen in der Herstellung elektrischer und elektronischer Geräte (EEG), rücken nach Jahren der erfolgreichen Energieeffizienzpolitik zunehmend Aspekte der Materialeffizienz in den Fokus des produktbezogenen Umweltschutzes. Der Fokus des Forschungsvorhabens liegt auf der Kreislaufführbarkeit von Edel- und Sondermetallen sowie Kunststoffen, es werden jedoch ebenso kreislaufwirtschaftlich relevante Aspekte wie Lebensdauer und Reparierbarkeit von Produkten mitbetrachtet.

Das Forschungsvorhaben untersuchte anhand von vier Themengebieten unterschiedliche Aspekte der Materialeffizienz. Zunächst wurde das aktuelle Gerüst an Standards und Normen daraufhin analysiert, inwiefern Aspekte wie Reparierbarkeit, Recyclingfähigkeit mit besonderem Fokus auf die Zielstoffe Edel- und Sondermetalle sowie Kunststoffe verankert sind. Für die Fallstudien Notebooks, Smartphones, Flachbildschirmfernseher und Drucker wurde geprüft, welche Ökodesign-Maßnahmen eine verbesserte Kreislaufführbarkeit der Zielstoffe ermöglichen. Ein weiteres Fokusthema war die Entnehmbarkeit und Lebensdauer von wiederaufladbaren Gerätebatterien sowie die Erarbeitung weitergehender Anforderungen an akkubetriebene Geräte unter der Ökodesign-Richtlinie. Zuletzt wurden relevante Aspekte mehrerer Studien und Projekte auf europäischer Ebene begleitet und bewertet.

Auf Grundlage der ökologischen Relevanz und Effektivität sowie der politischen und herstellerseitigen Umsetzbarkeit erfolgte eine Bewertung der abgeleiteten Designmaßnahmen. Auf dieser Grundlage werden Handlungsempfehlungen an Akteure im produktpolitischen Umweltschutz ausgesprochen.

## **Abstract**

After years of successful implementation of product-related policies regarding the energy-efficiency of electrical and electronic equipment (EEE), aspects of material-efficiency increasingly move to the forefront. The focus of this project was on the recyclability of precious and special metals as well as plastics. However, other relevant aspects of the circular economy were also taken into account, such as durability and reparability of products.

The research project evaluated various aspects of material efficiency along four main themes. Firstly, the current framework of standards and norms was analyzed regarding whether and to what extent aspects such as reparability and recyclability are addressed, with a specific focus on the target materials in this research project – precious and special metals and plastics. Secondly, four case studies were evaluated in order to derive additional ecodesign requirements which could improve recyclability of the target materials. A further core theme was the removability and durability of rechargeable portable batteries and the development of appropriate requirements addressing battery-powered mobile devices under the ecodesign directive. Lastly, relevant aspects of selected studies and projects on European level were evaluated.

To evaluate the derived ecodesign requirements, the environmental relevance and effectiveness as well as the political and technical feasibility of implementation were assessed. On this basis, recommendations are made addressing stakeholders of product-related environmental protection.

## Danksagung

Die Autoren bedanken sich herzlich bei den folgenden Institutionen und Personen:

- ▶ Beim Fraunhofer-Institut für Zuverlässigkeit und Mikrointegration IZM, insbesondere Dr. Janis Winzer, Nils Dethlefs, Marina Proske, Lena Reichgardt, Florian Hofmann, Karsten Schischke und Dr. Nils F. Nissen für die umfangreiche Unterstützung bei der Durchführung dieses Forschungsvorhabens in Form von Hintergrundgesprächen, Workshops und Korrekturvorschlägen des Abschlussberichtes
- ▶ Bei den Teilnehmerinnen und Teilnehmern des Begleitkreises für die konstruktive Unterstützung durch fachlichen Austausch im Rahmen von Telefonkonferenzen und Workshops sowie für Einladungen zu Firmenbesichtigungen
- ▶ Beim Umweltbundesamt, insbesondere Dr. Ines Oehme, Andreas Halatsch, Marina Köhn und ihren Kolleginnen und Kollegen für die gute Zusammenarbeit

## Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis .....	6
Abbildungsverzeichnis .....	11
Tabellenverzeichnis .....	15
Abkürzungsverzeichnis .....	17
Zusammenfassung.....	19
Summary.....	35
1 Hintergrund und Ziele des Vorhabens.....	49
1.1 Zielsetzung und Aufgaben .....	49
1.2 Herangehensweise.....	51
2 Begriffsbestimmungen .....	52
3 Teil I: Kreislaufführbarkeit von Edel- und Sondermetallen und Kunststoffen aus Elektronikgeräten .....	54
3.1 Einführung und Zielstellung.....	54
3.1.1 Fallstudien und Zielstoffe.....	54
3.1.2 Altgeräteaufkommen .....	55
3.2 Ausgangslage .....	57
3.2.1 Gesetzliche Grundlagen .....	57
3.2.2 Umweltzeichen.....	58
3.2.3 Behandlung von EAG.....	59
3.2.4 Recycling von Edel- und Sondermetallen aus EAG.....	61
3.2.5 Recycling von Kunststoffen aus EAG .....	62
3.3 Screening von Projekten, die Edel- und Sondermetallrecycling im Fokus hatten.....	63
3.3.1 InAccess (BMBF, r3).....	64
3.3.2 UPgrade (BMBF, r3).....	65
3.3.3 cycLED (EU, FP7).....	66
3.3.4 Elektrohydraulische Zerkleinerung (EHZ).....	67
3.3.5 Screening Erkenntnisgewinn .....	68
3.4 Fallstudie 1: Notebooks .....	68
3.4.1 Marktdaten und Altgeräteaufkommen.....	69
3.4.2 Stoffliche Zusammensetzung und Recyclingpotential .....	69
3.4.3 Angenommenes Recyclingszenario.....	72
3.4.4 Bestehende Anforderungen.....	73
3.4.5 Demontageversuche mit Notebooks .....	75
3.4.6 Ergänzende Erkenntnisse .....	84

3.4.7	Zusammenfassung.....	85
3.5	Fallstudie 2: Smartphones .....	86
3.5.1	Marktdaten und Altgeräteaufkommen.....	86
3.5.2	Stoffliche Zusammensetzung und Recyclingpotential .....	87
3.5.3	Angenommenes Recyclingszenario.....	89
3.5.4	Bestehende Anforderungen.....	90
3.5.5	Demontageversuche mit Smartphones .....	91
3.5.6	Ergänzende Erkenntnisse .....	100
3.5.7	Zusammenfassung.....	101
3.6	Fallstudie 3: Flachbildschirmfernseher.....	102
3.6.1	Marktdaten und Altgeräteaufkommen.....	102
3.6.2	Stoffliche Zusammensetzung und Recyclingpotential .....	103
3.6.3	Angenommenes Recyclingszenario.....	106
3.6.4	Bestehende Anforderungen.....	106
3.6.5	Demontageversuche mit Flachbildschirm-TVs.....	107
3.6.6	Ergänzende Erkenntnisse .....	118
3.6.7	Zusammenfassung.....	118
3.7	Fallstudie 4: Schreibtischdrucker .....	119
3.7.1	Marktdaten und Altgeräteaufkommen.....	119
3.7.2	Stoffliche Zusammensetzung und Recyclingpotential .....	119
3.7.3	Angenommenes Recyclingszenario.....	122
3.7.4	Bestehende Anforderungen.....	122
3.7.5	Demontageversuche mit Druckern .....	124
3.7.6	Ergänzende Erkenntnisse .....	135
3.7.7	Zusammenfassung.....	135
3.8	Zusammenfassende Bewertung .....	136
4	Teil II: Entnehmbarkeit und Lebensdauer von Geräteakkumulatoren.....	137
4.1	Einführung und Zielstellung.....	137
4.2	Ausgangslage .....	137
4.2.1	Lithium-Ionen-Akkumulatoren.....	138
4.2.2	Lebensdauer von Li-Ion-Akkumulatoren.....	139
4.2.3	Kennzeichnung von Geräteakkumulatoren .....	139
4.3	Bestandsaufnahme zur Entnehmbarkeit .....	140
4.4	Fallstudie 1: Notebooks .....	143
4.4.1	Bestehende Anforderungen.....	143

4.4.2	Lebensdauer .....	145
4.4.3	Entnehmbarkeit.....	146
4.5	Fallstudie 2: Smartphones .....	146
4.5.1	Bestehende Anforderungen.....	146
4.5.2	Lebensdauer .....	146
4.5.3	Entnehmbarkeit.....	147
4.6	Fallstudie 5: E-Book-Reader .....	148
4.6.1	Bestehende Anforderungen.....	148
4.6.2	Lebensdauer .....	148
4.6.3	Entnehmbarkeit.....	149
4.7	Fallstudie 6: Elektrische Zahnbürsten.....	150
4.7.1	Bestehende Anforderungen.....	151
4.7.2	Lebensdauer .....	151
4.7.3	Entnehmbarkeit.....	151
5	Teil III: Ableitung von Designanforderungen .....	155
5.1	Herangehensweise.....	155
5.2	Designanforderungen an Notebooks.....	156
5.2.1	Batterien und Akkumulatoren .....	156
5.2.2	Demontagefreundliche Konstruktion.....	160
5.2.3	Massenspeicherlaufwerke .....	161
5.2.4	Displays .....	163
5.2.5	Mainboard.....	163
5.2.6	Weitere Anforderungen .....	164
5.3	Designanforderungen an Smartphones.....	164
5.3.1	Akkumulatoren.....	164
5.3.2	Demontagefreundliche Konstruktion.....	166
5.3.3	Weitere Anforderungen .....	168
5.4	Designanforderungen an Flachbildschirm-TVs .....	169
5.4.1	Kunststoffgehäuse.....	169
5.4.2	Displays .....	169
5.4.3	Weitere Anforderungen .....	170
5.5	Designanforderungen an Schreibtischdrucker .....	171
5.5.1	Kunststoffgehäuse.....	171
5.5.2	Demontagefreundliche Konstruktion.....	171
5.5.3	Weitere Anforderungen .....	172

5.6	Designanforderungen an E-Book-Reader .....	172
5.6.1	Entnehmbarkeit, Austauschbarkeit und Lebensdauer von Akkumulatoren aus E-Book-Readern .....	172
5.7	Designanforderungen an elektrische Zahnbürsten .....	173
5.7.1	Entnehmbarkeit, Austauschbarkeit und Lebensdauer von Akkumulatoren aus elektrischen Zahnbürsten .....	173
5.8	Produktgruppenübergreifende Anforderungen .....	174
5.8.1	Entnehmbarkeit von Gerätebatterien.....	174
5.8.2	Demontagefreundliche Konstruktion.....	175
5.8.3	Entnehmbarkeit von Leiterplatten.....	177
5.8.4	Recyclingfähigkeit von Gehäusewerkstoffen .....	177
5.8.5	Recyclingfähigkeitsquote .....	179
5.8.6	Kennzeichnung von Kunststoffen.....	180
5.8.7	Einsatz von Sekundärrohstoffen .....	180
5.9	Weitere Anforderungen an Gerätebatterien.....	181
5.9.1	Lebensdauer von Gerätebatterien.....	181
5.9.2	Informationsanforderungen .....	183
5.9.3	Verfügbarkeit von Ersatzakkumulatoren .....	184
5.10	Diskussion weiterer Anforderungen.....	185
6	Handlungsempfehlungen .....	186
7	Ausblick und weiterer Forschungsbedarf .....	189
7.1	Verbesserung der Datengrundlage zur Materialzusammensetzung von EEG und EAG.....	189
7.2	Verbesserung der Kreislaufführbarkeit von Polymerwerkstoffen.....	190
7.3	Einfluss von Fügetechniken auf die automatisierte Zerlegung von EAG .....	190
7.4	Beispiele für nachhaltige Produktkonzeption.....	190
8	Literaturverzeichnis .....	192
9	Anhänge.....	195
9.1	Interviews mit Teilnehmern des Begleitkreises.....	195
9.2	AP1: Untersuchung der Normung von Aspekten der Materialeffizienz .....	198
9.2.1	Hintergrund und Ziele .....	198
9.2.2	Erläuterungen zu ausgewählten Prüfkriterien .....	199
9.2.3	Auswertung der ausgewählten Normen und Standards.....	202
9.2.4	Zusammenfassung und Auswertung.....	217
9.2.5	Empfehlungen .....	218
9.3	AP4: Begleitung von EU-Studien.....	219

9.3.1	MEErP EcoReport Tool .....	219
9.3.2	REAPro-Methodik.....	222
9.4	Protokoll der Abschlussveranstaltung mit Teilnehmern des Begleitkreises am 17.04.2018 in Berlin.....	233
9.4.1	Designanforderungen an Smartphones .....	233
9.4.2	Designanforderungen an Notebooks .....	235
9.4.3	Designanforderungen an Schreibtischdrucker.....	236
9.4.4	Designanforderungen an Flachbildschirmfernseher.....	237
9.4.5	Anforderungen an Gerätebatterien .....	237
9.4.6	Produktübergreifende Anforderungen .....	238
9.4.7	Weitere Stellungnahmen zu diversen Themen.....	238

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Potentielles Altgeräteaufkommen [Mio. Stk.] der Fallstudien in den Jahren 2015, 2020 und 2025 .....	21
Abbildung 2:	Potentielles Altgeräteaufkommen [kt] der Fallstudien in den Jahren 2015, 2020 und 2025 .....	22
Abbildung 3:	Durchschnittliche Massenanteile der wesentlichen Komponenten der untersuchten Notebooks.....	22
Abbildung 4:	Öffnen des Gehäuses zur Entnahme eines integrierten Notebook-Akkus.....	23
Abbildung 5:	Darstellung der werkstofflichen Zusammensetzung eines Notebook-Gehäuseteils .....	24
Abbildung 6:	Durchschnittliche Massenanteile der wesentlichen Komponenten der untersuchten Smartphones .....	25
Abbildung 7:	Entnahme eines integrierten Akkus .....	26
Abbildung 8:	Beispielhafte Darstellung der werkstofflichen Zusammensetzung einer Smartphone-Rückseitenabdeckung aus Kunststoff .....	26
Abbildung 9:	Durchschnittliche Massenanteile der wesentlichen Komponenten der untersuchten Flachbildschirmfernseher.....	27
Abbildung 10:	Beispielhafte Darstellung der benötigten Arbeitsschritte zur Öffnung der Rückseitenabdeckung.....	28
Abbildung 11:	Leiterplatten eines OLED-TVs .....	28
Abbildung 12:	Durchschnittliche Massenanteile der wesentlichen Komponenten der untersuchten Schreibtischdrucker unterteilt in Tintenstrahl- und Laserdrucker .....	29
Abbildung 13:	Massenanteile der Kunststofftypen an Druckergehäusen laut Kennzeichnung.....	30
Abbildung 14:	Entnahme der Leiterplatten von DUT_7 und DUT_8.....	30
Abbildung 15:	Entwicklung der Entnehmbarkeit von Akkus aus den bestverkauften Smartphone Modellen nach Erscheinungsjahr zwischen 2010 und 2016 auf Basis von Daten von Counterpoint Research .....	32
Abbildung 16:	Potentielles Altgeräteaufkommen [Mio. Stk.] der Zielprodukte in den Jahren 2015, 2020 und 2025 .....	56
Abbildung 17:	Potentielles Altgeräteaufkommen [kt] der Zielprodukte in den Jahren 2015, 2020 und 2025 .....	57
Abbildung 18:	Massen der wesentlichen Komponenten der untersuchten Notebooks.....	70
Abbildung 19:	Durchschnittliche Massenanteile der wesentlichen Komponenten der untersuchten Notebooks.....	70
Abbildung 20:	Beispielhafte Darstellung der Zielstoffe und Zuordnung zu Notebook Komponenten .....	76

Abbildung 21:	Manuelle Entnahme eines Notebooks Akkus anhand DUT_1 .....	77
Abbildung 22:	Öffnen des Gehäuses zur Entnahme von integrierten Notebooks Akkus anhand DUT_5 und DUT_6.....	78
Abbildung 23:	Öffnen des Gehäuses zur Entnahme von integrierten Notebooks Akkus anhand DUT_2.....	78
Abbildung 24:	Entnommene Akkupacks von DUT_4 und DUT_5 .....	79
Abbildung 25:	In das Akkupack integrierte Leiterplatte nach Entfernen der umgebenden Kunststoffolie .....	79
Abbildung 26:	Entnahme der Festplatte aus einem Notebook mit Wartungsklappe	80
Abbildung 27:	SSD Laufwerk als Steckkarte auf dem Mainboard von DUT_2 .....	81
Abbildung 28:	Beispielhafte Darstellung der werkstofflichen Zusammensetzung eines Notebook Gehäuseteils anhand DUT_2.....	82
Abbildung 29:	Teilweise entstücktes Mainboard von Notebook DUT_9.....	83
Abbildung 30:	Separierung des Displaymoduls von Gehäuseteilen anhand DUT_5 .	84
Abbildung 31:	Beispiel von Notebook ICs mit PGA (links) und BGA (rechts) Technologie .....	85
Abbildung 32:	Massen der wesentlichen Komponenten der untersuchten Smartphones.....	87
Abbildung 33:	Durchschnittliche Massenanteile der wesentlichen Komponenten der untersuchten Smartphones .....	88
Abbildung 34:	Beispielhafte Darstellung der Zielstoffe und Zuordnung zu Smartphone Komponenten .....	93
Abbildung 35:	Arbeitsschritte zur Entnahme eines manuell entnehmbaren Akkus anhand DUT_2 .....	94
Abbildung 36:	Arbeitsschritte zur Entnahme eines integrierten Akkus anhand DUT_6 .....	94
Abbildung 37:	Entnahme eines integrierten Akkus anhand DUT_9 .....	95
Abbildung 38:	Entnahme eines integrierten Akkus anhand DUT_1 .....	96
Abbildung 39:	Beispiele für die zwei grundlegenden Typen des internen Smartphone Designs.....	97
Abbildung 40:	Entnahme eines Smartphone Displays anhand DUT_5 .....	97
Abbildung 41:	Entnahme eines Smartphone Displays anhand DUT_7 .....	98
Abbildung 42:	Beispielhafte Darstellung der werkstofflichen Zusammensetzung einer Smartphone Rückseitenabdeckung aus Kunststoff anhand DUT_2 .....	99
Abbildung 43:	Massen der wesentlichen Komponenten der untersuchten Flachbildschirmfernseher .....	103
Abbildung 44:	Durchschnittliche Massenanteile der wesentlichen Komponenten der untersuchten Flachbildschirmfernseher.....	104

Abbildung 45:	Beispielhafte Darstellung der Zielstoffe und Zuordnung zu TV Komponenten .....	109
Abbildung 46:	Beispielhafte Darstellung der benötigten Arbeitsschritte zur Öffnung der Rückseitenabdeckung anhand DUT_7.....	110
Abbildung 47	Massenanteile der eingesetzten Kunststofftypen an den untersuchten Flachbildschirmfernsehern anhand der Kunststoffkennzeichnung .....	111
Abbildung 48:	Beispiele für verschiedene Formate der Kunststoffkennzeichnung .	112
Abbildung 49:	Beispiel für eine nicht unmittelbar einsehbare Kunststofftypenkennzeichnung .....	113
Abbildung 50:	Separierung der Leiterplatten aus einem geöffneten LED-LCD-TV anhand DUT_5 .....	114
Abbildung 51:	Separierung der Leiterplatten aus einem geöffneten OLED-TV anhand DUT_11 .....	114
Abbildung 52:	Leiterplatten aus dem OLED-TV DUT_11.....	115
Abbildung 53:	Leiterplatten aus dem LED-LCD-TV DUT_9.....	116
Abbildung 54:	Separierung des Displaypanels des OLED TV vom stützenden Gerüst .....	117
Abbildung 55:	Massen der wesentlichen Komponenten der untersuchten Schreibtischdrucker .....	120
Abbildung 56:	Durchschnittliche Massenanteile der wesentlichen Komponenten der untersuchten Schreibtischdrucker unterteilt in Tintenstrahl- und Lasertechnik.....	120
Abbildung 57:	Beispielhafte Darstellung der Zielstoffe und Zuordnung zu Drucker Komponenten .....	126
Abbildung 58:	Entnahme der Tintenpatronen anhand DUT_1 und DUT_5 .....	128
Abbildung 59:	Schubfächer für Tonerkartuschen anhand DUT_7 und DUT_8 .....	128
Abbildung 60:	Öffnung des Kunststoffgehäuses von DUT_2 und DUT_4 .....	129
Abbildung 61:	Massenanteile der Kunststofftypen an Druckergehäusen laut Kennzeichnung.....	130
Abbildung 62:	Demontage der Scannereinheit von DUT_1 und DUT_4 .....	130
Abbildung 63:	Demontage der Scannereinheit von DUT_9 und DUT_8.....	131
Abbildung 64:	Entnahme der bildgebenden Einheit von DUT_2 und DUT_1 .....	131
Abbildung 65:	Entnahme der bildgebenden Einheit von DUT_7 und DUT_10 .....	132
Abbildung 66:	Entnahme der Leiterplatten von DUT_2 und DUT_3.....	133
Abbildung 67:	Entnahme der Leiterplatten von DUT_7 und DUT_8.....	133
Abbildung 68:	Entnahme des Auffangbehälters von DUT_4 und DUT_2 .....	134
Abbildung 69:	Entnahme des Auffangbehälters von DUT_8 und DUT_10 .....	134
Abbildung 70:	Beispiele für die Kennzeichnung von Akkumulatoren in der Praxis .	140

Abbildung 71:	Batteriekennzeichnung nach IEC Standard 62902 ED1 Entwurfssfassung Stand März 2017 .....	140
Abbildung 72:	Umsetzungsbeispiel der Informationsanforderung des Herstellers, die fehlende Entnehmbarkeit durch den Nutzer auf der Verpackung von Notebooks zu kennzeichnen.....	144
Abbildung 73:	Verteilung der Ladehäufigkeit von Smartphones eines Herstellers .	147
Abbildung 74:	Entwicklung der Entnehmbarkeit von Akkus aus den bestverkauften Smartphone Modellen nach Erscheinungsjahr zwischen 2010 und 2016 auf Basis von Daten von Counterpoint Research .....	148
Abbildung 75:	Teildemontierter E-Book-Reader; Markierung zeigt ungenutzte Fläche mit Kunststoffstabilisierungsstrukturen im Geräteinneren .....	150
Abbildung 76:	Demontage einer elektrischen Zahnbürste .....	152
Abbildung 77:	Ausgewählte Beispiele für Produkte, die auf nachhaltigen Konzepten basieren .....	190
Abbildung 78:	Darstellung der Umweltwirkung insgesamt und pro Lebensjahr für zwei fiktive Produkte .....	221

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Im Forschungsvorhaben betrachtete Produktgruppen .....	20
Tabelle 2:	Werkstoffe im Fokus des Forschungsvorhabens .....	20
Tabelle 3:	Angenommene Verweildauer der Zielprodukte in deutschen Haushalten in Jahren .....	21
Tabelle 4:	Im Forschungsvorhaben betrachtete Produktgruppen und jeweilige Begründungen für die Auswahl .....	55
Tabelle 5:	Werkstoffe im Fokus des Forschungsvorhabens .....	55
Tabelle 6:	Angenommene Verweildauer der Zielprodukte in Jahren .....	56
Tabelle 7:	Notebooks: Absatz und potentielltes Altgeräteaufkommen .....	69
Tabelle 8:	Potentielle Stoffmengen der Zielstoffe aus Alt-Notebooks in den Jahren 2015, 2020 und 2025; Komponenten mit dem größten Massenanteil des Zielstoffes .....	72
Tabelle 9:	Beschreibung der untersuchten Notebooks.....	75
Tabelle 10:	Kunststoffkennzeichnung in den wesentlichen Gehäuseelementen der untersuchten Notebooks .....	82
Tabelle 11:	Smartphones: Absatz und potentielltes Altgeräteaufkommen .....	86
Tabelle 12:	Potentielle Stoffmengen der Zielstoffe aus Alt-Smartphones in den Jahren 2015, 2020 und 2025; Komponenten mit dem größten Massenanteil des Zielstoffes .....	89
Tabelle 13:	Beschreibung der untersuchten Smartphones.....	91
Tabelle 14:	Flachbildschirmfernseher: Absatz und potentielltes Altgeräteaufkommen.....	103
Tabelle 15:	Potentielle Stoffmengen der Zielstoffe aus Alt-Flachbildschirmfernsehern in den Jahren 2015, 2020 und 2025; Komponenten mit dem größten Massenanteil des Zielstoffes .....	105
Tabelle 16:	Beschreibung der untersuchten Flachbildschirmfernseher .....	108
Tabelle 17:	Kunststoffkennzeichnung in den wesentlichen Gehäuseelementen der untersuchten Flachbildschirmfernseher .....	111
Tabelle 18:	Schreibtischdrucker: Absatz und potentielltes Altgeräteaufkommen.....	119
Tabelle 19:	Potentielle Stoffmengen der Zielstoffe aus Alt-Schreibtischdrucker in den Jahren 2015, 2020 und 2025; Komponenten mit dem größten Massenanteil des Zielstoffes .....	121
Tabelle 20:	Beschreibung der untersuchten Drucker.....	125
Tabelle 21:	Wesentliche Unterschiede zwischen Tintenstrahl- und Laserdruckern bzgl. der Zielkomponenten.....	127
Tabelle 22:	Einflussfaktoren und ihr qualitativer Einfluss auf die kalendarische und zyklische Alterung von Lithiumionenbatterien mit LCO-, NMC- und NCA-Kathode nach (Dethlefs 2017).....	139

Tabelle 23:	Definition zur Informationsanforderungen an Akkumulatoren aus EEG.....	183
Tabelle 24:	Auszug aus Tabelle C.1 — Gestaltungsvarianten und DO-Indikatoren (Seite 36, DIN CEN/TS 16524:2013-12).....	213
Tabelle 25:	Übersicht über die Bewertung der jeweiligen Kriterien der Normenschriften im Untersuchungsrahmen des Forschungsvorhabens.....	218
Tabelle 26:	Vergleich MEErP EcoReport Tool und ReaPro-Methodik .....	222

## Abkürzungsverzeichnis

<b>ABS</b>	Acryl-Butadien-Styrol
<b>ADP</b>	Abiotic Depletion Potential – Abiotisches Abbaupotenzial
<b>API</b>	Application Programming Interface – Anwendungsprogrammierschnittstelle
<b>B2C</b>	Business-to-Consumer - Kommunikations- und Geschäftsbeziehungen zwischen Unternehmen und Privatpersonen (Konsumenten, Kunden)
<b>CCFL</b>	Cold Cathode Fluorescent Lamp - fluoreszierende Kaltkathodenröhren
<b>CRM</b>	Critical Raw Materials – Wirtschaftsstrategische Rohstoffe
<b>DIN</b>	Deutsches Institut für Normung
<b>EAG</b>	Elektro- und Elektronik-Altgeräte
<b>ECD</b>	Environmentally Conscious Design – Umweltbewusstes Design
<b>EEG</b>	Elektro- und Elektronikgeräte
<b>EOl</b>	End-of-Life – Ende der Lebensdauer
<b>EPEAT</b>	Electronic Product Environmental Assessment Tool – Tool zur Umweltbewertung von elektronischen Produkten
<b>FBS</b>	Flachbildschirmfernseher
<b>GF</b>	Glass-Fiber - Glasfaser
<b>GWP</b>	Global Warming Potential – Treibhausgaspotential
<b>HDD</b>	Hard Disk Drive - Festplattenlaufwerk
<b>HIPS</b>	High Impact Polystyrene – Hochschlagfestes Polystyrol
<b>IC</b>	Integrated Circuit – integrierter Schaltkreis („Chip“)
<b>IEC</b>	International Electrotechnical Commission – Internationale Elektrotechnische Kommission
<b>IEEE</b>	Institute of Electrical and Electronics Engineers – Institut der elektrischen und Elektronik-Ingenieure
<b>IKT</b>	Informations- und Kommunikationstechnik
<b>ISO</b>	International Organization for Standardization – Internationale Organisation für Normung
<b>ITO</b>	Indium Tin Oxide - Indiumzinnoxid
<b>KMU</b>	Kleine und mittlere Unternehmen
<b>LCD</b>	Liquid Crystal Display – Flüssigkristallanzeige
<b>LED</b>	Light Emitting Diode - Leuchtdiode
<b>MEErP</b>	Methodology for Eco-design of Energy-related Products – Methodik für das Ökodesign von energiebetriebenen Produkten
<b>OLED</b>	Organic Light Emitting Diode - Organische Leuchtdiode
<b>ONR</b>	ON (Österreichische Normungsinstitut)-Regeln
<b>ÖRE</b>	öffentlich-rechtlichen Entsorgungsträger

<b>PAS</b>	Publicly Available Specification – öffentlich verfügbare Spezifikation
<b>PC</b>	Polycarbonat
<b>PCR</b>	Post-Consumer Recycled – Rezyklat aus dem Endverbraucherbereich
<b>PIR</b>	Post-Industrial Recycled – Rezyklat aus dem industriellen Ausschuss
<b>PMMA</b>	Polymethylmethacrylat
<b>REAPro</b>	Resource Efficiency Assessment of Products – Bewertung der Ressourceneffizienz von Produkten
<b>SoC</b>	State of Charge - Ladezustand
<b>SSD</b>	Solid-State Drive - Halbleiterlaufwerk

## Zusammenfassung

Ziel des Vorhabens ist es, Potenziale für das Materialrecycling von elektrischen und elektronischen Produkten zu identifizieren und Handlungsempfehlungen zur Weiterentwicklung von produktpolitischen Instrumenten zu formulieren, um so insgesamt zu einer Reduktion der Ressourceninanspruchnahme beizutragen. Um eine materialeffiziente und abfallvermeidende Produktgestaltung zu erreichen, fokussierte das Forschungsvorhaben die verbesserte Kreislaufführbarkeit von Edelmetallen sowie Kunststoffen, recyclinggerechte Konstruktion, den vermehrten Einsatz von Sekundärmaterialien und die Steigerung der Wieder- und Weiternutzung. Weiterhin wurden die Aspekte Produktlebensdauer, Reparierbarkeit und Ersatzteilverfügbarkeit mitbetrachtet.

Zur Erreichung dieser Ziele wurden die folgenden Arbeiten durchgeführt:

- ▶ Evaluation von Normen und Bewertungssystemen hinsichtlich der Aspekte Produktlanglebigkeit, Reparierbarkeit und Recyclingfähigkeit, um Handlungsempfehlungen für produktpolitische Instrumente abzuleiten.
- ▶ Zusammentragen von relevanten Projekterkenntnissen jüngst und aktuell durchgeführter Forschungsvorhaben mit der Fragestellung, wie Edelmetalle sowie Kunststoffe aus Elektro- und Elektronikaltgeräten zurückgewonnen werden können.
- ▶ Durchführung von Expertenbefragungen mit Produktherstellern und Betreibern von Behandlungs- und Recyclinganlagen, um Erkenntnisse darüber zu gewinnen, wie Design, Aufbau, Verbindung und Beschaffenheit von Produkten vorgenommen werden müssten, um eine verbesserte Recyclingfähigkeit gewährleisten zu können.
- ▶ Entwicklung von Ökodesign-Anforderungen für vier Produktgruppen: Notebook, Smartphone, Flachbildschirmfernseher und Drucker.
- ▶ Evaluation und Beschreibung, welche der möglichen Anforderungen für welches der produktpolitischen Instrumente Ökodesign-Richtlinie, Produktkennzeichnung (verpflichtende EU-Energieverbrauchskennzeichnung), freiwillige Umweltzeichen (Blaue Engel, EU-Umweltzeichen, etc.) sowie Anforderungen für die umweltfreundliche öffentliche Beschaffung geeignet sind.
- ▶ Durchführung eines Workshops mit Produktherstellern, Reparaturbetrieben sowie Betreibern von Behandlungs- und Recyclinganlagen, um die Erkenntnisse der Expertenbefragungen vor dem Hintergrund der Fragestellung einer verbesserten Recyclingfähigkeit, aber auch Produktlanglebigkeit und Reparierbarkeit, zu diskutieren.
- ▶ Erstellen einer Bestandsaufnahme, bei welchen batteriebetriebenen Produktgruppen die Entnehmbarkeit der Gerätebatterie durch den Endnutzer oder Fachservice möglich und sinnvoll ist und welche Ausnahmen ggf. notwendig sind.
- ▶ Erarbeiten von Vorschlägen für erweiterte Anforderungen zur Funktionalität von Gerätebatterien und deren Entnehmbarkeit aus funktionsfähigen Geräten sowie aus Altgeräten im Rahmen von Durchführungsmaßnahmen unter der Ökodesign-Richtlinie.
- ▶ Begleitung von EU-Studien und Ableitung von Handlungsempfehlungen, insbesondere Aktivitäten des Joint Research Centre (JRC), hinsichtlich der Methodenentwicklung zur Bestimmung von für die Ressourceneffizienz relevanten Parametern.

Eine Analyse des Produktdesigns marktaktueller Geräte erfolgte anhand von Stichproben in Demontageversuchen. Die Demontagen erfolgten möglichst zerstörungsfrei und in einer Tiefe, wie sie in der Praxis im Recyclingbetrieb nicht kostendeckend durchgeführt werden können. Ziel dabei war, aus Sicht der Ressourcenschonung besonders positive oder negative Designmerkmale zu identifizieren. Als weitere Informationsquelle und zur Absicherung der anhand der Stichproben erlangter Erkenntnisse, wurde ein Begleitkreis für die Laufzeit des Vorhabens ins Leben gerufen. Teilnehmer wurden dazu aus den Bereichen der Recycling- und Reparaturpraxis, Gerätehersteller, Wissenschaft, Behörden

und Non-Profit-Organisationen eingeladen. Insgesamt beteiligten sich 41 Organisationen aktiv am Projekt. Die Aktivitäten des Begleitkreises setzten sich aus insgesamt drei durchgeführten Telefonkonferenzen, einem ganztägigen Workshop, teilstrukturierten Interviews, Betriebsbesichtigungen, persönlichen Gesprächen und einer halbtägigen Abschlussveranstaltung zusammen. Die Erkenntnisse fließen in alle Abschnitte dieses Berichts mit ein.

**Teil I: Kreislaufführbarkeit von Edel- und Sondermetallen und Kunststoffen aus Elektronikgeräten**

Der Schwerpunkt der Arbeiten lag auf der Analyse von Produktdesignaspekten, welche die Kreislauf-führung von Edel- und Sondermetallen sowie Kunststoffen aus Elektro(nik)altgeräten (EAG) erschwe- ren oder sogar verhindern. Dies wurde zunächst in Demontageversuchen anhand marktaktueller Pro- dukte untersucht. Die Ergebnisse wurden anschließend mit Marktteilnehmern diskutiert. Die Auswahl der zu untersuchenden Fallstudien fand in Abstimmung mit dem Umweltbundesamt statt (Tabelle 1).

Tabelle 1: Im Forschungsvorhaben betrachtete Produktgruppen

Fallstudien	Begründung für die Auswahl
Notebook	Input für die Revision der Anforderungen unter der Ökodesign-RL
Smartphone	Input für die Revision der Anforderungen unter dem Blauen Engel
Flachbildschirm-TV	Input für die Revision der Anforderungen unter der Ökodesign-RL
Drucker	Anknüpfungspunkt freiwillige Selbstverpflichtung; verstärkter Fokus auf Kunst- stoffe

In Tabelle 2 sind die in diesem Forschungsvorhaben betrachteten Werkstoffe aufgeführt. Die Werk- stoffe wurden in die drei Gruppen Edelmetalle, Sondermetalle und Kunststoffe gegliedert. Unter Son- dermetallen werden insbesondere Technologiemetalle verstanden, die spezielle Funktionen erfüllen und in der Regel in geringen Mengen in bestimmten elektronischen Produkten verwendet werden. Un- ter den Kunststoffen wurden solche Polymerwerkstoffe betrachtet, die in ausgewählten Fallstudien besonders mengenrelevant sind.

Tabelle 2: Werkstoffe im Fokus des Forschungsvorhabens

Edelmetalle	Sondermetalle	Kunststoffe
Gold	Kobalt	ABS
Platin	Neodym	PS
Silber	Tantal	HIPS
Kupfer <sup>1</sup>	Gallium	PC
Palladium	Indium	PMMA

Um die Relevanz der untersuchten Produktgruppen im Recyclingprozess bewerten zu können, erfolgte eine Recherche der Absatzzahlen der Zielprodukte. Für Deutschland wurde zusätzlich das potentielle Altgeräteaufkommen abgeschätzt. Hierfür wurde eine durchschnittliche Verweildauer der Produkte in deutschen Haushalten angenommen (Tabelle 3) und das Geräteaufkommen abgeschätzt, das nicht mehr aktiv genutzt wird und somit potentiell dem Recyclingprozess zur Verfügung steht. Aufgrund fortlaufender technischer Innovationen der untersuchten Produktgruppen ließen sich mitunter keine konkreten Verweildauern, sondern nur Bereiche festlegen.

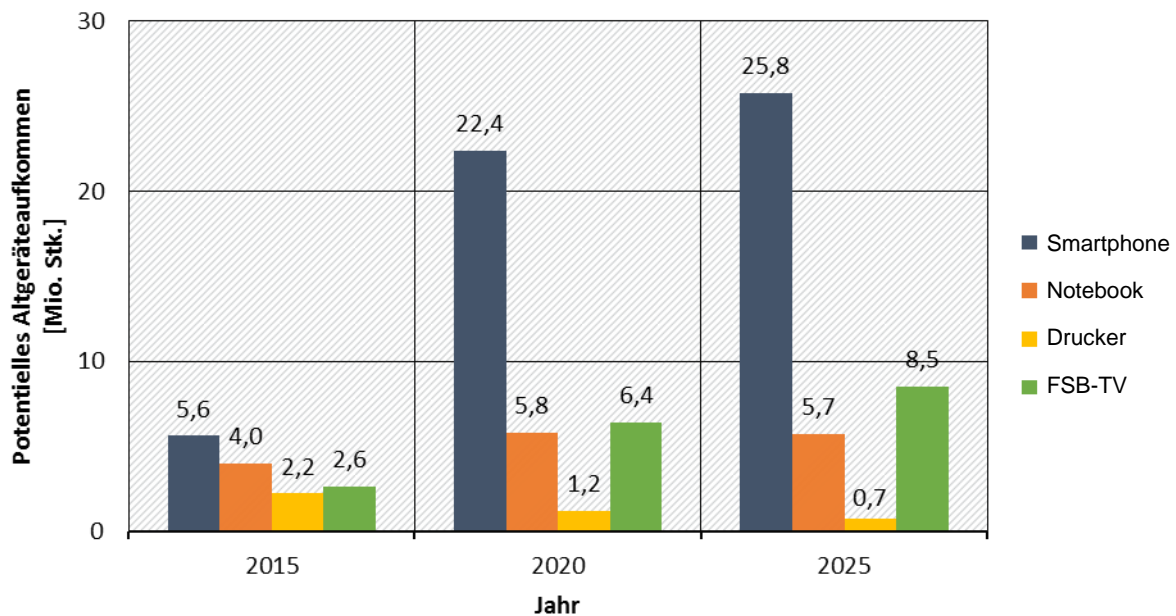
<sup>1</sup> Kupfer wird in diesem Bericht gemeinsam mit den Edelmetallen aufgeführt, ist aber eigentlich ein Halbedelmetall

Tabelle 3: Angenommene Verweildauer der Zielprodukte in deutschen Haushalten in Jahren

	Notebook	Smartphone	FBS-TV	Drucker
Nutzungsdauer nach (Stobbe et al. 2015)	4 - 5,5	2,5 - 3,5	3 - 8	8
Angenommene Verweildauer [Jahre]	7,5	5 - 6	5 - 10	10

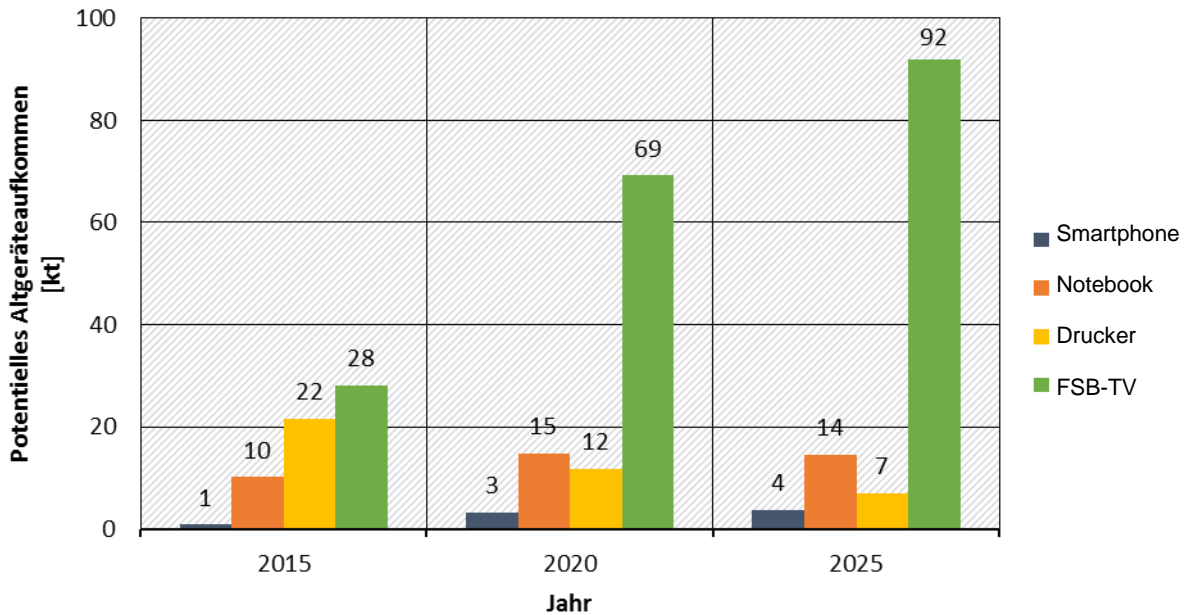
Abbildung 1 zeigt das potentielle Altgeräteaufkommen der vier Fallstudien in den Jahren 2015, 2020 und 2025 in Millionen Stück. Abbildung 2 zeigt das Altgeräteaufkommen in den gleichen Jahren in Kilotonnen. Berücksichtigt wurden weder die durch unsachgemäße Entsorgung verbrachten Altgeräte, noch die exportierten Altgeräte, die der fachgerechten Entsorgung in Deutschland nicht zugeführt wurden. Die tatsächlichen in den sachgerechten Recyclingpfad in Deutschland eingehenden Gerätezahlen und Massen sind entsprechend niedriger einzuschätzen.

Abbildung 1: Potentielles Altgeräteaufkommen [Mio. Stk.] der Fallstudien in den Jahren 2015, 2020 und 2025



Quelle: Eigene Darstellung, Technische Universität Berlin

Abbildung 2: Potentielles Altgeräteaufkommen [kt] der Fallstudien in den Jahren 2015, 2020 und 2025

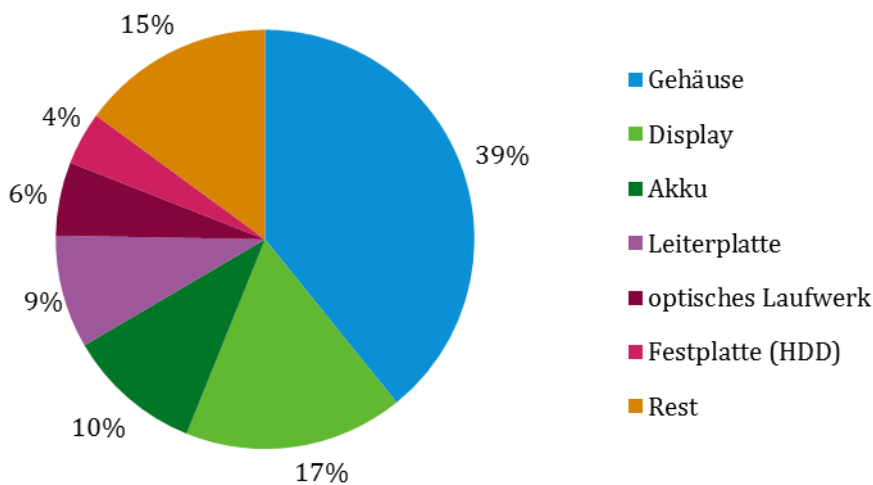


Quelle: Eigene Darstellung, Technische Universität Berlin

**Fallstudie 1: Notebooks**

Abbildung 3 zeigt die durchschnittliche Zusammensetzung der Notebooks in der untersuchten Stichprobe. Das Gesamtgewicht eines durchschnittlichen Notebooks liegt demnach bei 2,53 kg. Das Gehäuse hat daran mit 39 Prozent den höchsten Anteil, gefolgt von der Displayeinheit mit 17 Prozent. Die Gerätebatterie und die verbauten Leiterplatten haben im Durchschnitt jeweils einen Anteil von rund 10 Prozent am Gesamtgewicht.

Abbildung 3: Durchschnittliche Massenanteile der wesentlichen Komponenten der untersuchten Notebooks



Quelle: Eigene Darstellung, Technische Universität Berlin

Neben den Edelmetallen sind im potentiellen Altgeräteaufkommen von Notebooks speziell Kobalt, Tantal und Neodym in relevanten Mengen zu erwarten. Bei den untersuchten Notebooks ist PC-ABS der am häufigsten verwendete Polymerwerkstoff.

Anhand der Demontageversuche und ergänzenden Marktrecherchen lässt sich bei Notebooks ein Trend hin zur höheren Integration von elektronischen Baugruppen erkennen. Dies betrifft neben Akkumulatoren auch den Prozessor, Arbeitsspeicher und Massenspeicher. Für das Recycling der in Notebooks enthaltenen Ressourcen ist die Möglichkeit der einfachen und zügigen Separierung des Akkus in der Erstbehandlung ein essentieller Schritt (vgl. Abbildung 4). Für Prozessor, Arbeitsspeicher und Massenspeicher ist unter Umständen eine leichte Separierung für eine Weiternutzung sinnvoll. Falls eine Festplatte (HDD) als Massenspeicher verbaut ist, ist auch hier eine leichte Separierung, als Voraussetzung für eine mögliche Wiedergewinnung von Neodym aus Permanentmagneten, sinnvoll.

Abbildung 4: Öffnen des Gehäuses zur Entnahme eines integrierten Notebook-Akkus

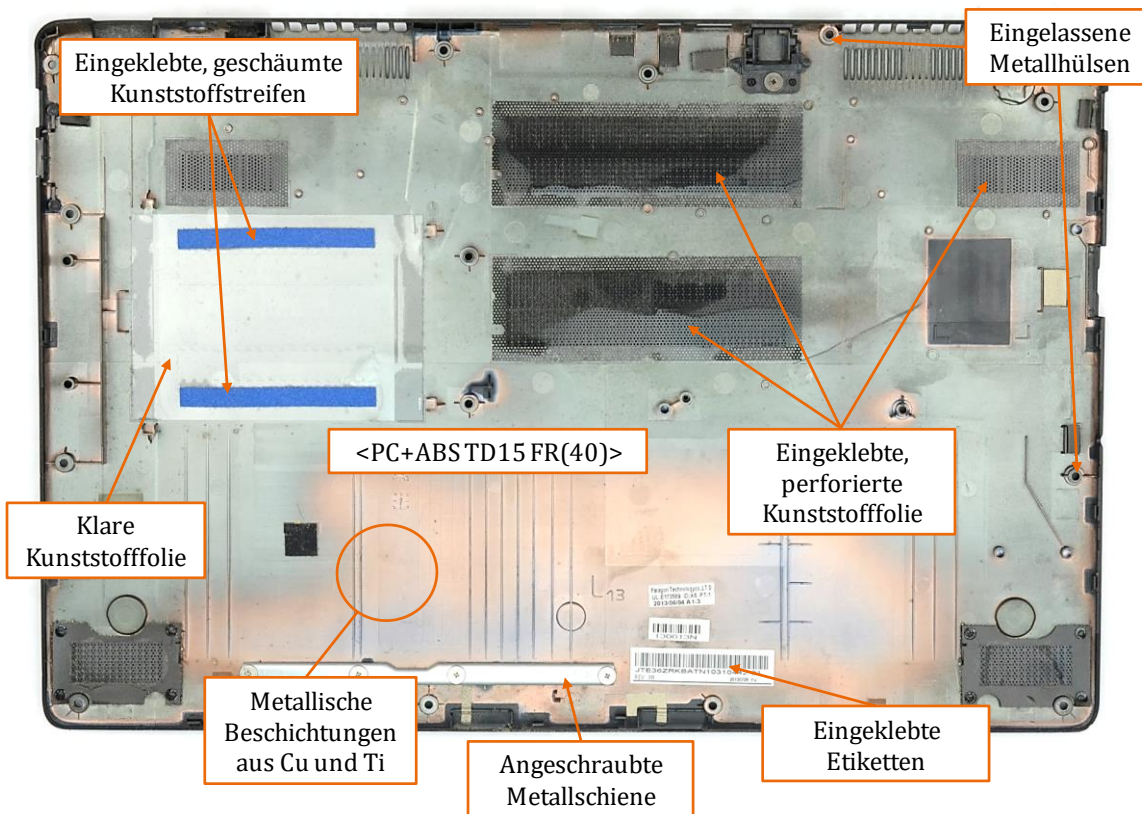


Quelle: Eigene Darstellung, Technische Universität Berlin

Nach dem Lösen von 17 Schrauben (links) konnte die Gehäuseunterseite vom Gerät separiert werden, um Zugriff zu den wesentlichen elektronischen Baugruppen zu erhalten. Eine Schraube war durch einen Aufkleber verdeckt und damit nicht unmittelbar ersichtlic. Das Akkupack von DUT\_2 konnte nach dem Lösen des markierten Steckverbinders aus dem Gerät entnommen werden (rechts).

Gehäusekunststoffe sind bei Notebooks komplexe Materialverbünde. Sie stellen einen Massenanteil von fast 40 Prozent im Durchschnitt der untersuchten Stichprobe dar. Dennoch wird zum aktuellen Zeitpunkt das Potential, die Recyclingfähigkeit mittels Ökodesign-Anforderungen deutlich zu erhöhen, als gering eingeschätzt. Begründet wird diese Einschätzung durch die vielfältigen Anforderungen, die das Gehäuse erfüllen muss, einschließlich des thermischen Managements, dem Schutz der internen funktionalen Komponenten und der mechanischen Stabilität.

Abbildung 5: Darstellung der werkstofflichen Zusammensetzung eines Notebook-Gehäuseteils



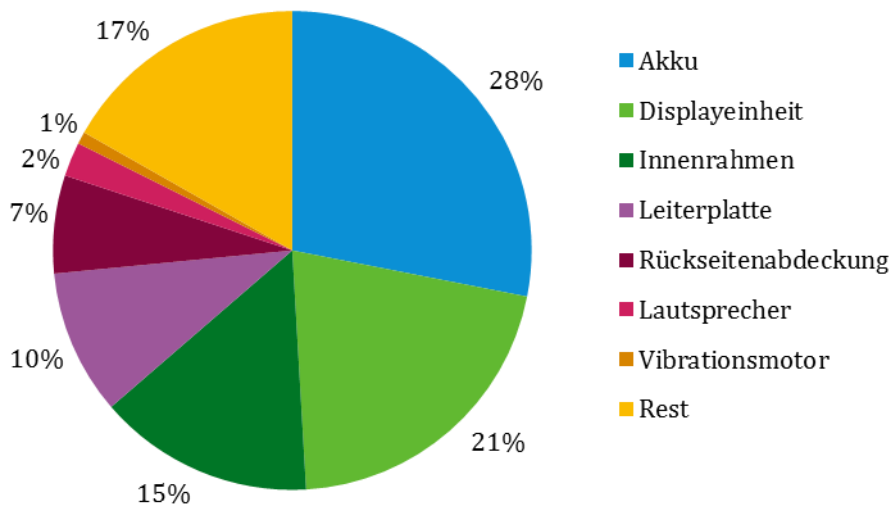
Quelle: Eigene Darstellung, Technische Universität Berlin

Der Fokus bei der Entwicklung von Anforderungen an das Produktdesign von Notebooks liegt zunächst auf der Entnehmbarkeit von Akkumulatoren. Diese enthalten in Summe ein erhebliches Mengenpotential der untersuchten Zielstoffe, insbesondere Kobalt und Kupfer. Weiterhin wird bei einigen Notebookkomponenten das Potential für eine Wiederverwendung gesehen. Dies betrifft insbesondere den Arbeits- sowie den Massenspeicher.

### Fallstudie 2: Smartphones

Abbildung 6 zeigt die durchschnittliche Zusammensetzung der Smartphones in der untersuchten Stichprobe. Das Gesamtgewicht des durchschnittlichen Smartphones liegt demnach bei 140 Gramm. Die Gerätebatterie hat daran mit 28 Prozent den höchsten Anteil, gefolgt von der Displayeinheit mit 21 Prozent. Die verbauten Leiterplatten beanspruchen durchschnittlich 10 Prozent des Gesamtgewichtes.

Abbildung 6: Durchschnittliche Massenanteile der wesentlichen Komponenten der untersuchten Smartphones

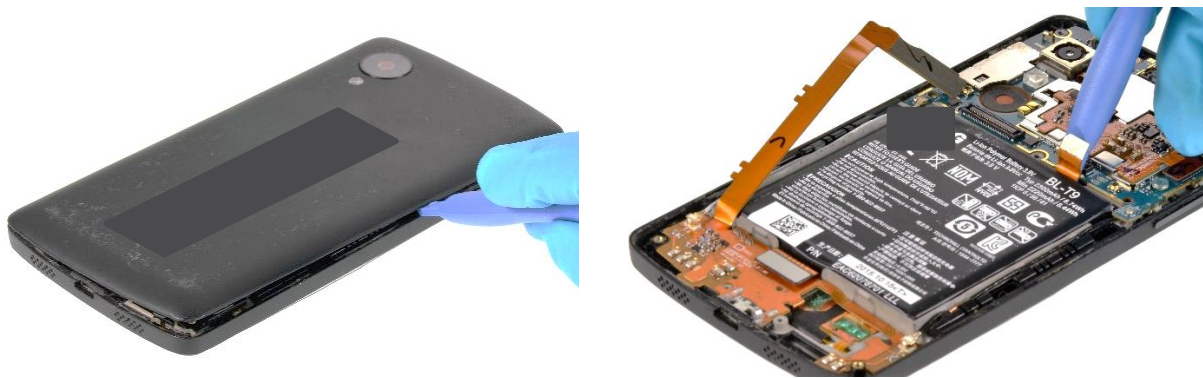


Quelle: Eigene Darstellung, Technische Universität Berlin

Unter den untersuchten Geräten waren drei mit manuell entnehmbarem Akku und sechs mit integriertem (fest verbauten) Akku. Bei manuell entnehmbaren Akkus war der Aufwand zur Entnahme gering und der Vorgang zügig (in wenigen Sekunden) durchführbar. Bei Geräten mit integriertem Akkumulator schwankte der benötigte Aufwand und damit der notwendige Zeiteinsatz, lag aber in der Regel deutlich höher als bei Geräten mit manuell entnehmbarem Akku.

Zur Entnahme jeglicher Komponenten muss zunächst das Gehäuse geöffnet werden. Dies erfolgt je nach Gerätedesign entweder durch die Separierung des Displays oder durch das Ablösen der Rückseitenabdeckung. Die Separierung des Displays als erster Schritt in der Demontage vereinfacht insbesondere auf das Display abzielende Reparaturvorhaben, erschwert aber potentiell den Austausch des Akkumulators, da das Display relativ leicht bei der Entnahme beschädigt werden kann. Die Separierung der Rückseitenabdeckung erfolgt über das Lösen von Schraubverbindungen, Clips oder Klebverbindungen. Schrauben sind i.d.R. einfach lösbar, teilweise werden jedoch Schrauben mit proprietären oder seltenen Köpfen eingesetzt. Teilweise werden Schrauben eingesetzt, deren Material so weich ist, dass sie nach einem Schraubvorgang nicht mehr nutzbar sind. Clips sind teilweise leicht manuell lösbar und teilweise nur schwer mit Werkzeug lösbar. Einige Klebstoffe lassen sich nach geringer Wärmezufuhr lösen, andere benötigen erheblich höhere Wärmezufuhr. Durch diese Varianz können die unterschiedlichen Verbindungstechniken nicht pauschal hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf die Demontagefähigkeit bewertet werden.

Abbildung 7: Entnahme eines integrierten Akkus



Quelle: Eigene Darstellung, Technische Universität Berlin

Die Separierung der Rückseitenabdeckung erforderte den Einsatz eines hebelnden Werkzeugs (links). Die Entnahme des Akkus erforderte ein ebensolches Werkzeug (rechts). Hier erschwerte insbesondere die Kombination aus biegsamer Pouchzelle, Einsatz von Klebstoff sowie Magnesiumrahmen um die Akkuzelle herum die Entnahme.

Die Rückseitenabdeckungen von Smartphone bestanden in allen untersuchten Fällen aus Verbänden verschiedener Materialien. Bei Rückseitenabdeckungen aus Kunststoff wird oftmals Polycarbonat eingesetzt. Wie in Abbildung 8 beispielhaft dargestellt, handelt es sich dabei jedoch i.d.R. nicht um Monomaterialien. Die Glasfaserverstärkung des Basispolymers, in Kombination mit stoffschlüssig verbundenen Materialien wie Gummierungen, sprechen für eine schlechte Recyclingfähigkeit in den gängigen Prozessen (z.B. Dichtentrennung).

Abbildung 8: Beispielhafte Darstellung der werkstofflichen Zusammensetzung einer Smartphone-Rückseitenabdeckung aus Kunststoff



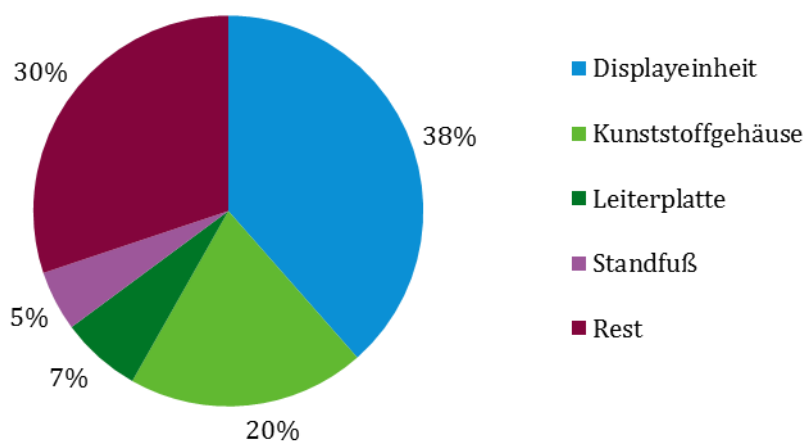
Quelle: Eigene Darstellung, Technische Universität Berlin

Der Schutz vor dem Eindringen von Flüssigkeiten und Fremdkörpern in das Geräteinnere ist aus Sicht der Langlebigkeit ein bedeutender Faktor, der möglicherweise im Widerspruch zu Designentscheidungen steht, die eine einfache Demontage ermöglichen. So muss abgewogen werden, welcher Aspekt bei Smartphones prioritär behandelt werden soll.

### Fallstudie 3: Flachbildschirmfernseher

Abbildung 9 zeigt die durchschnittliche Zusammensetzung der Flachbildschirmfernseher in der untersuchten Stichprobe. Durchschnittlich machte die Displayeinheit bei den untersuchten Geräten rund 39 Prozent der Gesamtmasse aus, das Kunststoffgehäuse im Schnitt rund 20 Prozent. Die verbauten Leiterplatten beanspruchten durchschnittlich sieben Prozent des Gesamtgewichtes. Der Standfuß aus Kunststoff war durchschnittlich für fünf Prozent der Gesamtmasse verantwortlich.

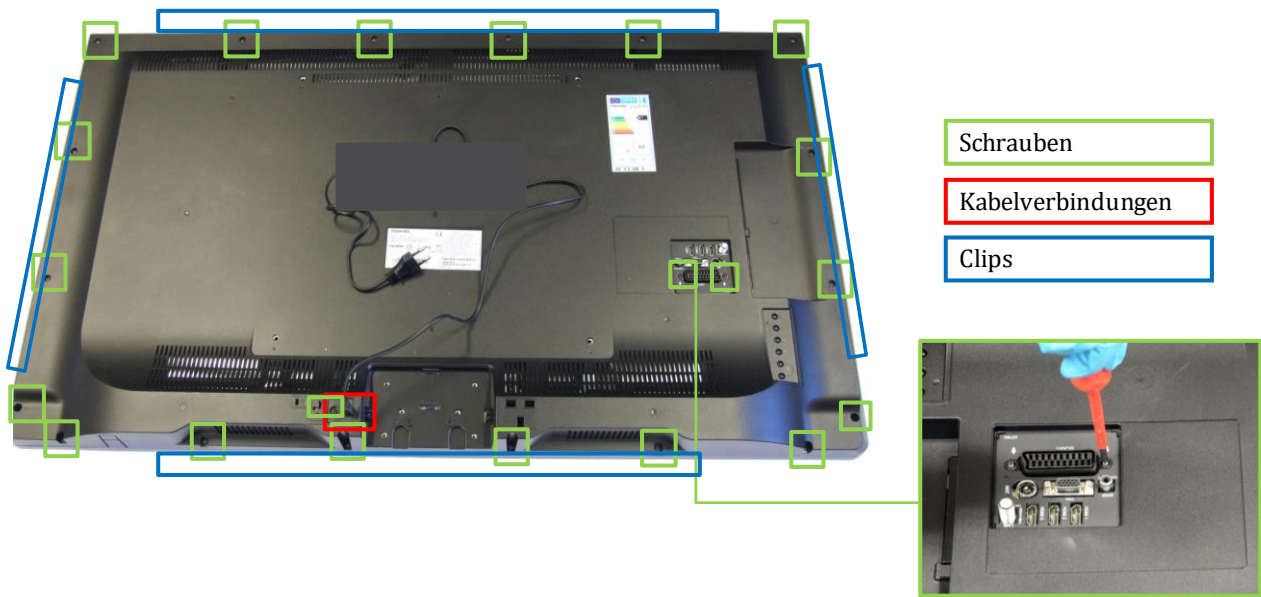
Abbildung 9: Durchschnittliche Massenanteile der wesentlichen Komponenten der untersuchten Flachbildschirmfernseher



Quelle: Eigene Darstellung, Technische Universität Berlin

Zur Demontage der Fernsehgeräte musste zunächst jeweils die Rückwand separiert werden. Hierzu war das Lösen etlicher Schraubverbindungen und Clips notwendig. Anhand der untersuchten Stichprobe konnte der Einsatz von Klebstoffen für den Verschluss der Gehäuseelemente nicht festgestellt werden. Die Rückwände sind große Kunststoffeile, die bei einer manuellen Demontage als Ganzes separiert werden. In den Gehäuseteilen werden mehrheitlich Flammschutzmittel eingesetzt. Ein stoffliches Recycling kann daher nur erfolgen, wenn sich Recyclingprozesse für flammschutzmittelversetzte Kunststoffe durchsetzen. Weiterhin sind in den Gehäuseteilen, insbesondere den Frontrahmen, häufig Glasfaserverstärkungen eingebracht, welche die Geräte robuster machen sollen, jedoch das Kunststoffrecycling dieser Teile in gängigen Recyclingprozessen verhindern.

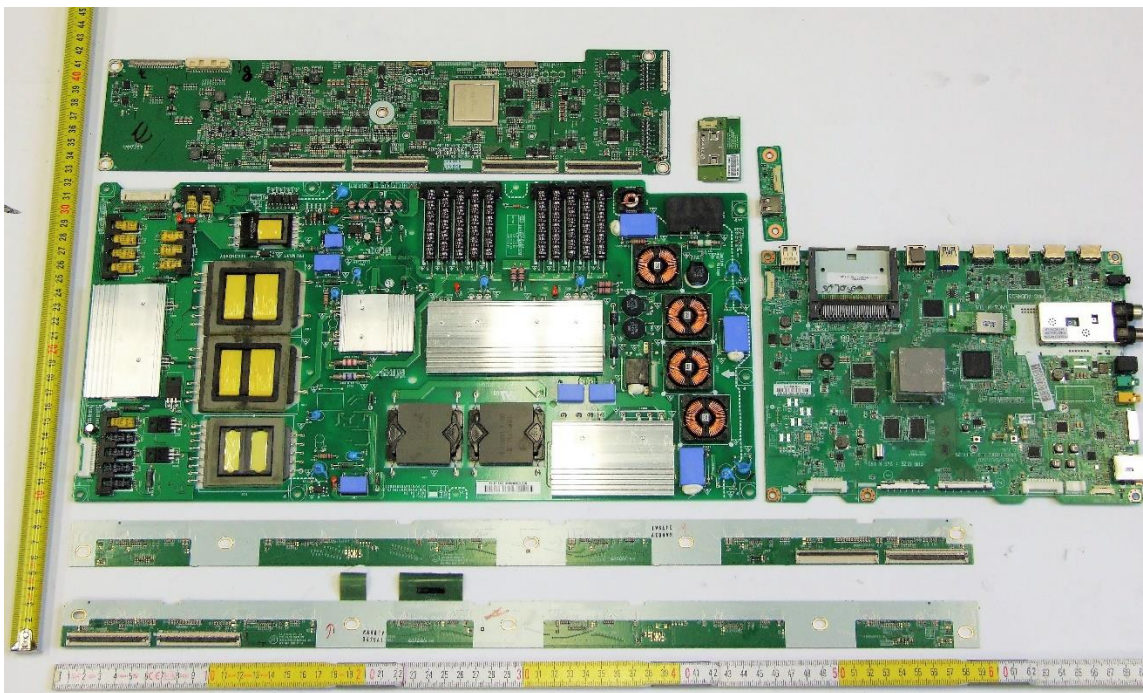
Abbildung 10: Beispielhafte Darstellung der benötigten Arbeitsschritte zur Öffnung der Rückseitenabdeckung



Quelle: Eigene Darstellung, Technische Universität Berlin

Die Leiterplatten der untersuchten Flachbildschirmfernseher waren hinsichtlich der Fläche und Masse relevant für ein stoffliches Recycling. Eine gute Separierbarkeit sollte im Produktdesign vorgesehen oder durch entsprechende Behandlungsanforderungen adressiert werden.

Abbildung 11: Leiterplatten eines OLED-TVs

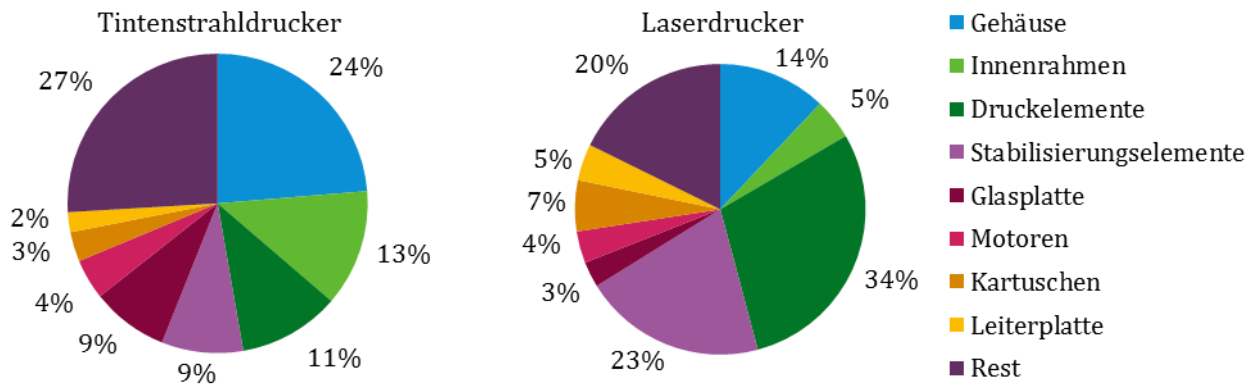


Quelle: Dimitrova, o.J.

### Fallstudie 4: Schreibtischdrucker

Abbildung 12 zeigt die durchschnittliche Zusammensetzung der untersuchten Tintenstrahl- und Laserdrucker auf Komponentenebene. Das Gesamtgewicht des durchschnittlichen Tintenstrahl Druckers lag bei 7,8 kg, das des durchschnittlichen Laserdruckers mit 22,8 kg deutlich höher.

Abbildung 12: Durchschnittliche Massenanteile der wesentlichen Komponenten der untersuchten Schreibtischdrucker unterteilt in Tintenstrahl- und Laserdrucker



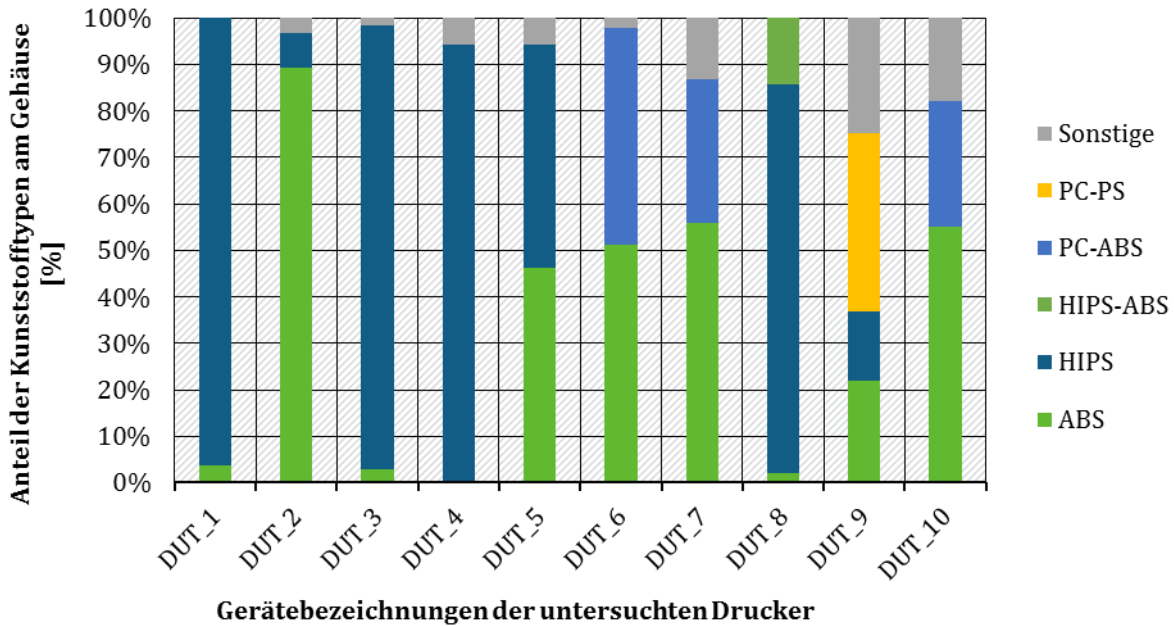
Quelle: Eigene Darstellung, Technische Universität Berlin

Bei Tintenstrahl Druckern stellen große Elemente aus Kunststoff mit 37 Prozent (Summe Gehäuse und Innenrahmen, ohne Kartuschen und weitere Kunststoffteile) einen erheblichen Masseanteil. Auf Leiterplatten entfallen lediglich zwei Prozent der Gesamtmasse. Bei Laserdruckern haben Metalle einen erheblich höheren Masseanteil als bei Tintenstrahl Druckern. Insbesondere die Stabilisierungselemente aus Eisenmetall stellen mit 23 Prozent einen erheblichen Anteil. Die Leiterplatten haben mit fünf Prozent einen höheren Masseanteil als bei Tintenstrahl Druckern.

Bedingt durch die beweglichen Komponenten zur Papierführung im Gerät und zur Steuerung der bildgebenden Einheiten sind Drucker im Vergleich zu den anderen untersuchten Produktgruppen komplexer und uneinheitlicher im internen Aufbau. Die Demontage der zehn Drucker verdeutlichte, dass eine allgemeingültige Abfolge von Demontageschritten für die Produktgruppe nicht definiert werden kann.

Eine wesentliche Erkenntnis bei der Identifizierung von Kunststofftypen ist, dass bei Gehäuseelementen von Tintenstrahl Druckern oftmals nur HIPS, nur ABS, oder teils HIPS und ABS eingesetzt werden. Weiterhin sind in den Gehäuseteilen der untersuchten Stichprobe laut Kennzeichnung keine Flammenschutzmittel eingesetzt. Bei Laserdruckern war die Vielfalt der eingesetzten Kunststofftypen im Vergleich höher. Ebenfalls werden bei Kunststoffteilen von Laserdruckern mehrheitlich Flammenschutzmittel zugesetzt.

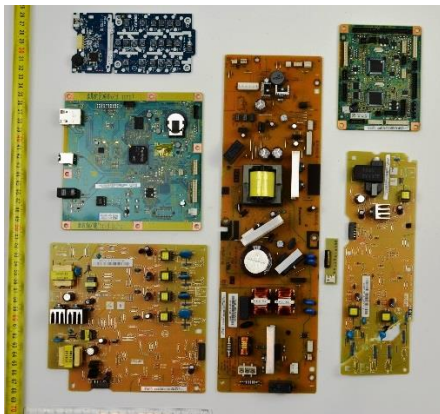
Abbildung 13: Massenanteile der Kunststofftypen an Druckergehäusen laut Kennzeichnung



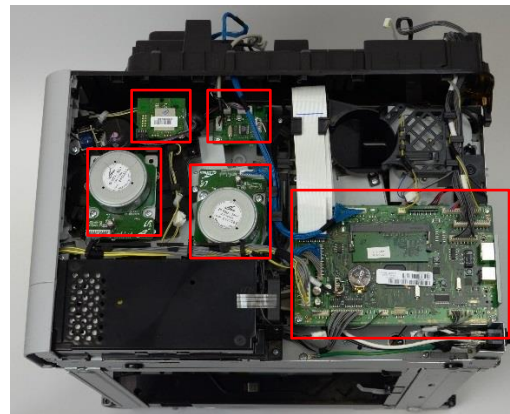
Quelle: Eigene Darstellung, Technische Universität Berlin

In Relation zum Gesamtgewicht ist in den untersuchten Tintenstrahldruckern eine geringe Anzahl an bzw. Fläche von Leiterplatten verbaut. Die Entnahme aller Leiterplatten in den Demontageversuchen war aufwendig und zeitintensiv (vgl. Abbildung 66).

Abbildung 14: Entnahme der Leiterplatten von DUT\_7 und DUT\_8



DUT\_7: Alle Leiterplatten aus DUT\_7 und Maßstab



DUT\_8: Seitenansicht; Position verschiedener Leiterplatten im Gerät

Quelle: Eigene Darstellung, Technische Universität Berlin

Der Fokus der zu stellenden Ökodesign-Anforderungen bei Druckern sollte vor allem auf dem vergleichsweise hohen Kunststoffanteil liegen. Weiterhin ist Kupfer aus den Leiterplatten und Elektromotoren zu nennen.

## **Zusammenfassung der Erkenntnisse aus Teil I**

Die Bedeutung der untersuchten Produktgruppen im Recyclingprozess hinsichtlich der untersuchten Werkstoffe lässt sich anhand der in Kapitel 3.1.2 abgeschätzten Altgeräteaufkommens in Verbindung mit den zu Grunde gelegten Materialkonzentrationen bewerten. Für die untersuchten Produktgruppen können Flachbildschirmfernseher, gefolgt von Notebooks und Smartphones, das größte Recyclingpotential für Edel- und Sondermetalle (ausgenommen Kobalt) zugeschrieben werden. Unter Berücksichtigung der zu erwartenden Zunahme von Altgeräten der Produktgruppen Flachbildschirmfernseher und Smartphones, ist mit einer wachsenden Bedeutung dieser Produktgruppen im Recyclingprozess zu rechnen. Kobalt wird, bezüglich der in diesem Forschungsvorhaben ausgewählten Fallstudien, überwiegend für die Kathoden von Gerätebatterien eingesetzt. Entsprechend bieten Notebooks, gefolgt von Smartphones, das größte Massenpotential zum stofflichen Recycling unter den untersuchten Produktgruppen.

Für das Recycling von Kunststoffen sind bei den untersuchten Fallstudien insbesondere Flachbildschirmfernseher und Schreibtischdrucker von Bedeutung. Die hohen Tonnagen an verbauten Kunststoffgehäusen bei vergleichsweise geringer Materialvielfalt unterstützen diese Einschätzung. In den untersuchten Notebooks sind zwar ähnlich hohe Mengen an Kunststoffen im Altgeräteaufkommen zu erwarten, diese können jedoch aufgrund von Metallbeschichtungen, Metalleinschlüssen, verwendeten Flammschutzmitteln und aufgetragenen Beschichtungen in aktuell gängigen Recyclingprozessen nicht oder nur zu einem geringen Anteil stofflich zurückgewonnen werden.

## **Teil II: Entnehmbarkeit und Lebensdauer von Gerätebatterien**

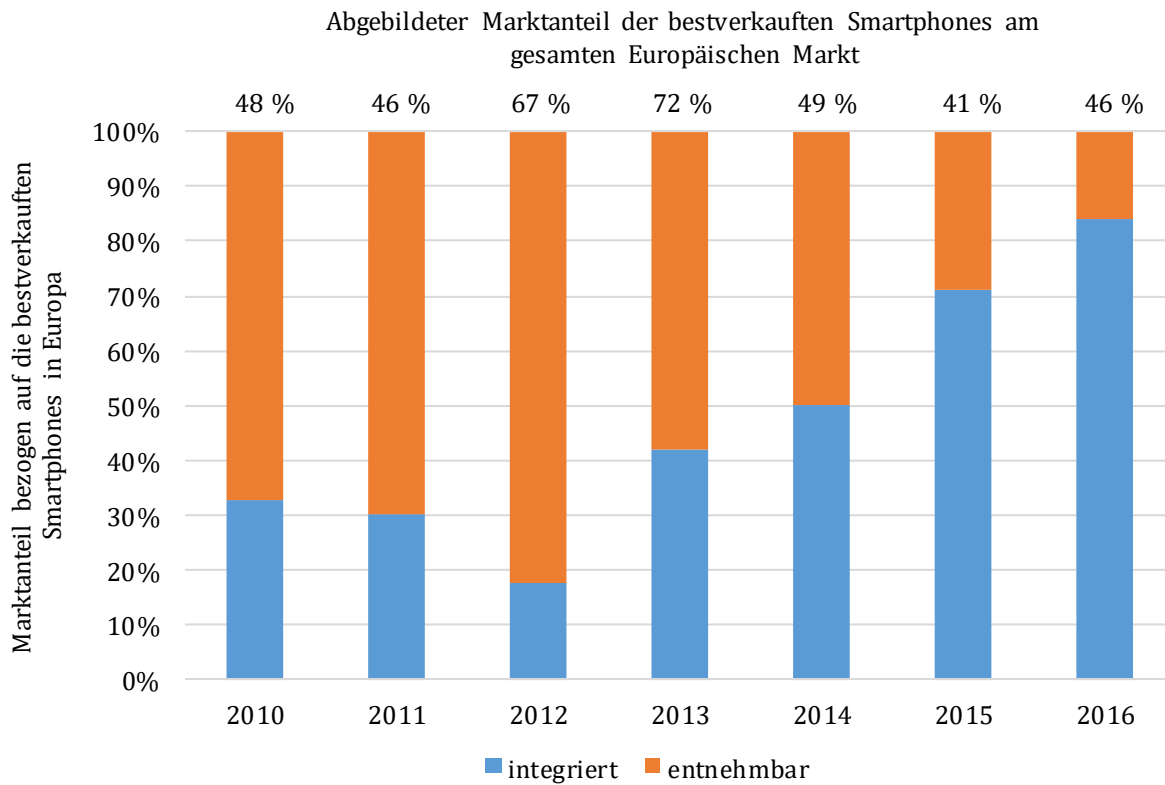
In vielen Elektro- und Elektronikgeräten stellt der Akkumulator eine der Schlüsselkomponenten im Hinblick auf die Umweltauswirkungen dar. Aufgrund der im Vergleich zum Gesamtprodukt oftmals stärker begrenzten Lebensdauer von Akkumulatoren, kann die Gesamtumweltbilanz bei einer angestrebten Nutzungsverlängerung maßgeblich durch diese beeinflusst werden. Damit das Ende der Lebensdauer eines Akkumulators nicht zwangsläufig zur frühzeitigen Beendigung der Nutzungsphase des Endgerätes führt, ist es vorteilhaft, Akkumulatoren problemlos im Laufe der Nutzungsphase austauschen zu können. Dies ermöglicht potentiell eine längere Nutzungsdauer der Endgeräte und dient somit der Umwelt- und Ressourcenschonung. Des Weiteren muss eine problemlose Entnehmbarkeit von Batterien und Akkumulatoren aus Altgeräten gewährleistet sein, damit die gesetzlich vorgeschriebene Separierung vom Altgerät laut ElektroG am Ende der Nutzungsphase durch eine Erstbehandlungsanlage qualitativ hochwertig vorgenommen werden kann.

Im Rahmen dieser Studie wurden Vorschläge für erweiterte Anforderungen an Produkte im Rahmen der Ökodesign-Richtlinie mit Bezug zur Lebensdauer und Entnehmbarkeit von Akkumulatoren erarbeitet. Die folgenden vier Produktgruppen wurden für diese Arbeiten als Fallstudien ausgewählt:

- ▶ Notebook
- ▶ Smartphone
- ▶ E-Book-Reader
- ▶ Elektrische Zahnbürste

Für die Zusammenfassung wird die Produktgruppe der Smartphones als Beispiel herangezogen. Der Trend zur Integration von Akkumulatoren in Smartphones kann anhand derer Entnehmbarkeit bei verkaufsstarken Smartphone-Modellen belegt werden (Abbildung 15). Marktdaten zu den absatzstärksten Smartphones in Europa (Counterpoint Research 2017) wurden mit Daten zur Entnehmbarkeit des Akkumulators der jeweiligen Modelle hinterlegt. Die Daten für die Jahre 2010 bis 2016 deuten darauf hin, dass der Anteil der Smartphones mit für den Nutzer ohne den Einsatz von Werkzeug wechselbarem Akku seit 2012 kontinuierlich zurückgeht. Anzeichen für eine Umkehr dieses Trends werden zum Zeitpunkt der Berichtsfassung nicht gesehen.

Abbildung 15: Entwicklung der Entnehmbarkeit von Akkus aus den bestverkauften Smartphone Modellen nach Erscheinungsjahr zwischen 2010 und 2016 auf Basis von Daten von Counterpoint Research



Die Aufstellung enthält Marktdaten von den bestverkauften Smartphone-Modellen nach Jahren. Die Anzahl der Modelle, von denen Daten in die Aufstellung einfließen, lag zwischen 16 (im Jahr 2010) und 25 (im Jahr 2016). Der addierte Anteil dieser Modelle am gesamten Europäischen Markt ist oberhalb der Datensäulen angegeben und variiert zwischen 46 und 72 Prozent. Daten zu den weiteren am Markt verfügbaren Smartphone-Modellen und zu deren Konstruktion lagen dem Forschungsvorhaben nicht vor.

Quelle: Eigene Darstellung, Technische Universität Berlin

Als weiteres Beispiel an dieser Stelle dienen elektrische Zahnbürsten. Bei acht der 11 Modelle der untersuchten elektrischen Zahnbürsten war der integrierte Akku im inneren des Gerätes an die Leiterplatte gelötet. Zwei weitere Modelle konnten nicht zerstörungsfrei geöffnet werden. Ein Modell wurde mit einer wechselbaren Batterie betrieben. Die untersuchte, nicht-repräsentative Stichprobe weist darauf hin, dass das Verlöten der Batterie in Zahnbürsten gängige Praxis ist.

### Teil III: Ableitung von Designanforderungen

In Kapitel 5 werden auf Basis der in den vorhergehenden Kapiteln erlangten Erkenntnisse Designanforderungen an die untersuchten Produktgruppen, als auch produktgruppenübergreifende Anforderungen, formuliert. Zu jeder Anforderung wird die erwartete Relevanz, Effektivität und Umsetzbarkeit bewertet. Im Kapitel 6 werden Handlungsempfehlungen in Form der wesentlichen Anforderungen zu jeder Fallstudie ausgesprochen. In dieser Zusammenfassung können nicht alle 30 vorgeschlagenen Anforderungen im Einzelnen mit Begründungen und Bewertungen aufgeführt werden. Daher wird im Folgenden lediglich die thematische Ausrichtung der Handlungsempfehlungen zu jeder Fallstudie zusammengefasst.

### **Zusammenfassung der Handlungsempfehlungen zu Notebooks**

Bei Notebooks steht die Entnehmbarkeit der Akkumulatoren im Zuge der Erstbehandlung im Vordergrund. Es werden verschiedene Anforderungen formuliert, die die Entnehmbarkeit vereinfachen sollen, um ein Verbringen der Akkumulatoren in ein fachgerechtes Batterierecycling zu fördern. Es werden keine Anforderungen an die Gestaltung der Leiterplatten gestellt, da diese als wesentlicher ökonomischer Treiber der Recyclingaktivitäten mit hoher Wahrscheinlichkeit ohnehin mehrheitlich in fachgerechte Recyclingprozesse verbracht werden. Die Recyclingfähigkeit der Kunststoffgehäuse ist nach aktuellem Stand nur begrenzt gegeben und sollte gefördert werden. Das Recycling von Indium aus Displays wird bei Flachbildschirmfernsehern zurzeit als aussichtsreicher als bei Notebooks betrachtet. Der Marktanteil von Notebooks mit Festplattenlaufwerken nimmt voraussichtlich weiter ab, daher wird eine Anforderung an die Entnehmbarkeit dieser, zum Zweck eines stofflichen Recyclings von Neodym, als nicht notwendig angesehen. Die Entnehmbarkeit von Komponenten, die zur Wiederverwendung geeignet sind, wie bspw. Massenspeicher und Arbeitsspeicher, sollte durch entsprechende Anforderungen gewährleistet sein. Daten auf Massenspeichern sollten unwiderruflich löschar sein, um eine Weiter- bzw. Wiederverwendung der Geräte bzw. Komponenten zu fördern.

### **Zusammenfassung der Handlungsempfehlungen zu Smartphones**

Aus ökobilanzieller Sicht sollte die Verlängerung der Nutzungsdauer von Smartphones im Vordergrund stehen. Eine Austauschbarkeit von Komponenten wird als ein wesentlicher Faktor gesehen, der die Langlebigkeit fördern kann. Es wird empfohlen, ausschließlich lösbare Verbindungstechniken bei Smartphones einzusetzen, um die Entnahme recyclingrelevanter Komponenten zu begünstigen. Dies betrifft auch die Entnehmbarkeit von Akkumulatoren im Recyclingprozess bzw. deren Austauschbarkeit in der Nutzungsphase. Es wird angenommen, dass die Leiterplatten als ökonomischer Treiber der Recyclingaktivitäten mehrheitlich dem fachgerechten Recyclingpfad zur Verfügung stehen und eine Separierbarkeit nicht durch Ökodesign-Anforderungen reguliert werden muss.

### **Zusammenfassung der Handlungsempfehlungen zu Flachbildschirmfernsehern**

Bei Flachbildschirmfernsehern wird vorgeschlagen, einerseits die Demontagefähigkeit der Geräte zu erhöhen und andererseits Anforderungen an die Behandlung der Geräte im Recyclingprozess zu stellen. Eine einfache Demontierbarkeit der Rückwand ermöglicht einen schnellen Zugriff auf die enthaltenen Leiterplatten und potentiell die Displayeinheit. Weiterhin werden Anforderungen an die Recyclingfähigkeit eingesetzter Werkstoffe gestellt.

### **Zusammenfassung der Handlungsempfehlungen zu Schreibtischdruckern**

Bei Schreibtischdruckern stehen die Recyclingfähigkeit der eingesetzten Kunststoffe sowie der Einsatz von Rezyklaten im Vordergrund. Dahingehend werden Anforderungen an die Werkstoffauswahl sowie an den Anteil von Kunststoffrezyklaten aus dem Post-Consumer-Bereich in Neugeräte gestellt. Weiterhin soll die Trennbarkeit von metallischen Werkstoffen und Kunststoffen gefördert werden.

### **Produktübergreifende bzw. produktgruppenunspecifische Handlungsempfehlungen**

Es wurden produktgruppenübergreifende Anforderungen formuliert, die prinzipiell auf verschiedene EEG angewandt werden können. Dabei werden Anforderungen formuliert an

- ▶ die grundsätzliche Entnehmbarkeit jeglicher Gerätebatterien und -akkumulatoren
- ▶ den Einsatz von Rezyklatkunststoffen
- ▶ die Materialvielfalt der eingesetzten Kunststoffe
- ▶ die normgerechte Kennzeichnung eingesetzter Kunststoffe
- ▶ die Langlebigkeit von Akkumulatoren

Weiterhin wird Bedarf für Normenarbeit gesehen, beispielsweise für folgende Problemstellungen:

- ▶ Eine Angabe der Hersteller zur technischen Lebensdauer von Geräteakkumulatoren ist erst dann zwischen Geräten und Herstellern vergleichbar, wenn einheitliche Definitionen für verschiedene Testparameter in der Bestimmung der Zyklenbeständigkeit festgelegt werden (u.a. Laderegime, Spannungsgrenzen). Es wird vorgeschlagen, ein Normungsmandat anzustreben.
- ▶ Eine massenbasierte Recyclingfähigkeitsquote wird prinzipiell als sinnvoll erachtet, jedoch ist eine Überarbeitung des Standards IEC 62635 notwendig. Entsprechende Arbeiten laufen bereits bzw. sind z.T. bereits abgeschlossen (u.a. Normungsmandat M/543 und technische Literatur (Chancerel und Marwede 2016)).
- ▶ Es wird empfohlen, eine Klassifizierung von lösbaren bzw. unlösbaren Klebverbindungen im Rahmen der Normung zu erarbeiten.

## Summary

The aim of the project was to identify potentials for material recycling on product-level and to derive recommendations for the further development of product-policy instruments to contribute to an overall reduction of resource utilization. In order to achieve a product design that is material-efficient and waste-preventing, the project focused on the improved recyclability of precious and special metals and plastics, ecologically relevant materials, design for recycling, the increased use of secondary materials, and the increase in reuse of products and components. Furthermore, aspects of product lifetime, reparability, and spare part availability were taken into account.

To achieve these goals, the following work has been carried out:

- ▶ Evaluation of standards and rating systems with regard to product durability, reparability, and recyclability, in order to derive recommendations for product policy instruments.
- ▶ Gathering insights from recent and current research projects with respect to how precious and special metals as well as plastics can be recovered from WEEE.
- ▶ Conducting expert interviews with product manufacturers and operators of treatment and recycling plants to gain insight into how design, construction, and interconnection techniques can contribute to improved reparability and recyclability.
- ▶ Development of ecodesign recommendations for four product groups: notebooks, smartphones, flat screen televisions, and printers.
- ▶ Evaluating which of the product-policy instruments (Ecodesign Directive, product labeling (mandatory EU energy labeling), voluntary eco-labels (Blue Angel, EU Ecolabel, etc.) and requirements for green public procurement) are most suitable for the ecodesign requirements developed in this project
- ▶ Conducting a workshop with stakeholders, especially product manufacturers and operators of treatment and recycling facilities, to discuss findings against the background of improving product recyclability as well as durability and reparability.
- ▶ Creating of an inventory of product groups with rechargeable batteries and classifying for which product groups batteries are typically removable by the end user or specialized service, and definition of necessary exceptions.
- ▶ Accompanying EU studies and deriving recommendations, in particular activities of the Joint Research Center (JRC) with regard to the development of methods to determine parameters relevant to resource efficiency.

The product design of case study devices was determined in disassembly trials. Dismantling was carried out in a mostly non-destructive manner in order to carefully study the product design. The dismantling went further than recycling facilities can economically carry out. The goal was to identify particularly positive or negative design features from the point of view of resource conservation. An advisory board was initiated for the duration of the project as an additional source of information, as well as to safeguard findings from dismantling trials. Participants were invited from the fields of recycling and repair practice, equipment manufacturers, as well as academia, government agencies and non-profit organizations. In total, 41 organizations actively participated in the project. The advisory board's activities consisted of a total of three conference calls, a one-day workshop, semi-structured interviews, company visits, face-to-face talks, and a half-day closing event. The findings are incorporated into all sections of this report.

### **Part I: Recyclability of precious metals, special metals and plastics from waste electrical and electronic equipment**

The work focused on the analysis of product design aspects which hinder or even prevent the recycling of target materials from waste electrical and electronic equipment (WEEE). In a first step, design

aspects which foster or hinder recyclability were identified via disassembly trials with devices currently available on the market. The results were discussed with experts from the advisory board. Four case studies were selected for analysis (Table 1).

Table 1: Product groups chosen for analysis and the rationale for the inclusion

Case study	Rationale
Notebook	Input for the revision of requirements under the Ecodesign Directive
Smartphone	Input for the revision of requirements of the Blue Angel
Flat Screen TV	Input for the revision of requirements under the Ecodesign Directive
Printer	Link: Existing voluntary agreement; emphasized focus on plastics

The materials taken into account in this research project are listed in Table 2. The materials are divided into three groups: precious metals, special metals and plastics. Special metals are understood to be metals required for specific technological functions, and which are generally used in small quantities in certain electronic components. In the case of plastics, polymer materials are included which are considered to be relevant in terms of their volume in the electronic product categories under consideration.

Table 2: Materials in focus of this research project

Precious metals	Special metals	Plastics
Gold	Cobalt	ABS
Platinum	Neodymium	PS
Silver	Tantalum	HIPS
Copper	Gallium	PC
Palladium	Indium	PMMA

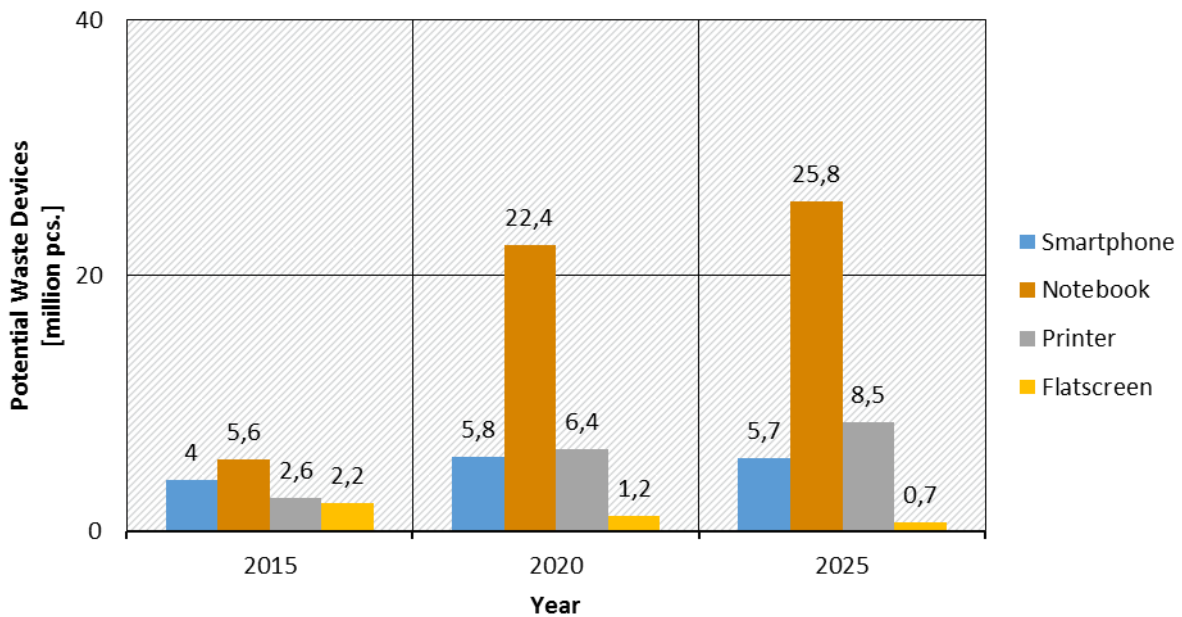
To be able to assess the relevance of each examined product group in the electronic waste recycling processes, firstly, the sales figures of the target products were researched. Secondly, the potential numbers of WEEE devices is estimated. To assess the potential waste stream of the target products in Germany, their residence time in German households was estimated (Table 3). The residence times were estimated on the basis of the useful service life from the literature (Stobbe et al., 2015) coupled with an additional retention period of the devices in German households to take into account the storage of defective or otherwise unused devices before disposal takes place. Due to continuous technical innovations of the product groups in focus, residence times may change with the maturity of the technological development within a product group. Hence, residence times are not always defined to one exact number of years, but rather change over time.

Table 3: Assumed averaged residence time of the target products in German households in years

	Notebook	Smartphone	Flat Screen TV	Printer
Service life (Stobbe et al. 2015)	4 - 5,5	2,5 - 3,5	3 - 8	8
Residence time [years]	7,5	5 - 6	5 - 10	10

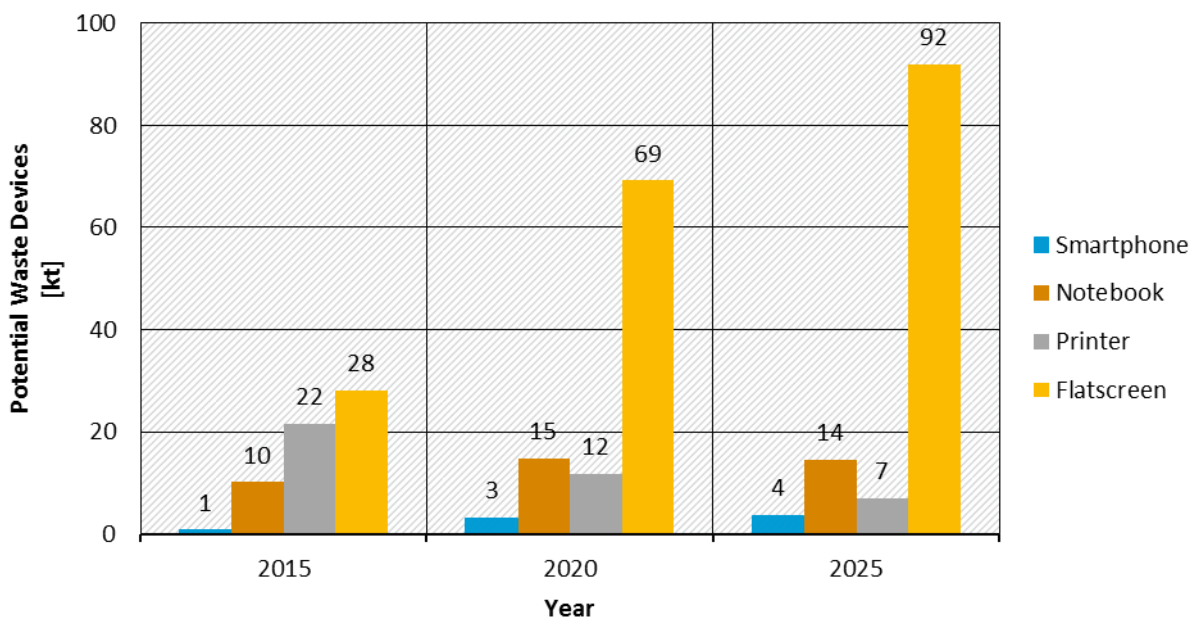
Figure 1 shows the potential amounts of waste for the four case studies in the years 2015, 2020 and 2025 in millions of pieces, Figure 2 shows the same data in kilotons. Any waste equipment disposed of by way of irregular disposal (e.g. via household waste) or exported WEEE (e.g. illegal shipment) was not taken into account. Consequently, the actual numbers and mass streams of devices entering the appropriate recycling path in Germany are likely lower.

Figure 1: Potential EoL devices of the target product groups in the years 2015, 2020, and 2025, in million units



Source: Own diagram, Technische Universität Berlin

Figure 2: Potential EoL devices of the target product groups in the years 2015, 2020, and 2025, in kilotons

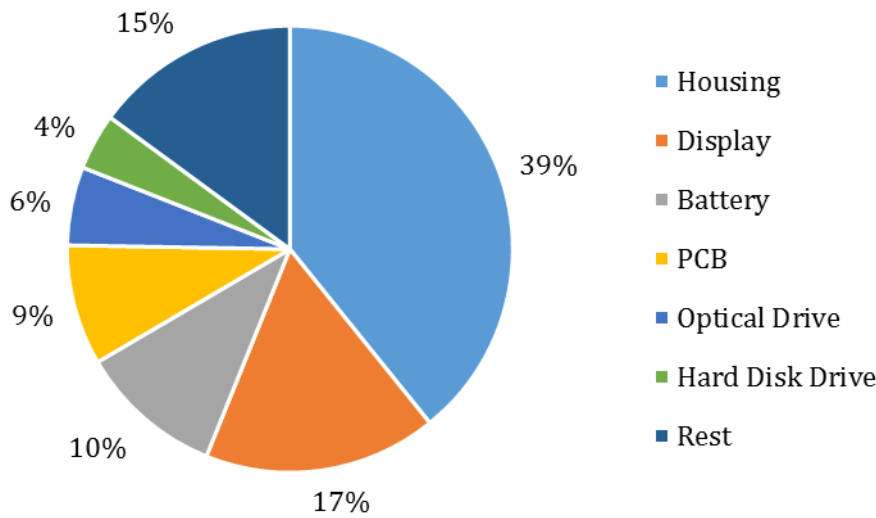


Source: Own diagram, Technische Universität Berlin

### Case study 1: Notebooks

Figure 3 shows the average composition of the disassembled notebooks. The total mass of the average notebook is 2.53 kg. The housing has the highest share by mass with 39 percent, followed by the display unit with 17 percent. The device battery and the printed circuit boards each have an average share of about 10 percent.

Figure 3: Average mass fraction of the major components of the examined notebooks



Source: Own diagram, Technische Universität Berlin

In addition to the precious metals, cobalt, tantalum and neodymium are to be expected in relevant quantities in waste notebooks. Among the polymers in scope of this study, PC-ABS was the most widely used plastic material.

Judging from the analysis of the design of notebooks in disassembly trials, a trend can be observed towards the increased miniaturization and integration of electronic components in notebooks. In addition to batteries this also affects the processor, memory and mass memory. For the recycling of resources contained in the notebook, the possibility of simple and quick separation of the battery in the pre-treatment processes is an essential step. The work flow to separate an integrated notebooks battery in a damage-free disassembly is shown in Figure 4. For processor, memory and mass storage, easy separation may be useful for component reuse. If a hard disk drive (HDD) is installed as the mass storage device, easy separation is also useful as a prerequisite for a possible recovery of neodymium from magnets.

Figure 4: Opening of the housing to remove the integrated notebook battery from DUT\_2

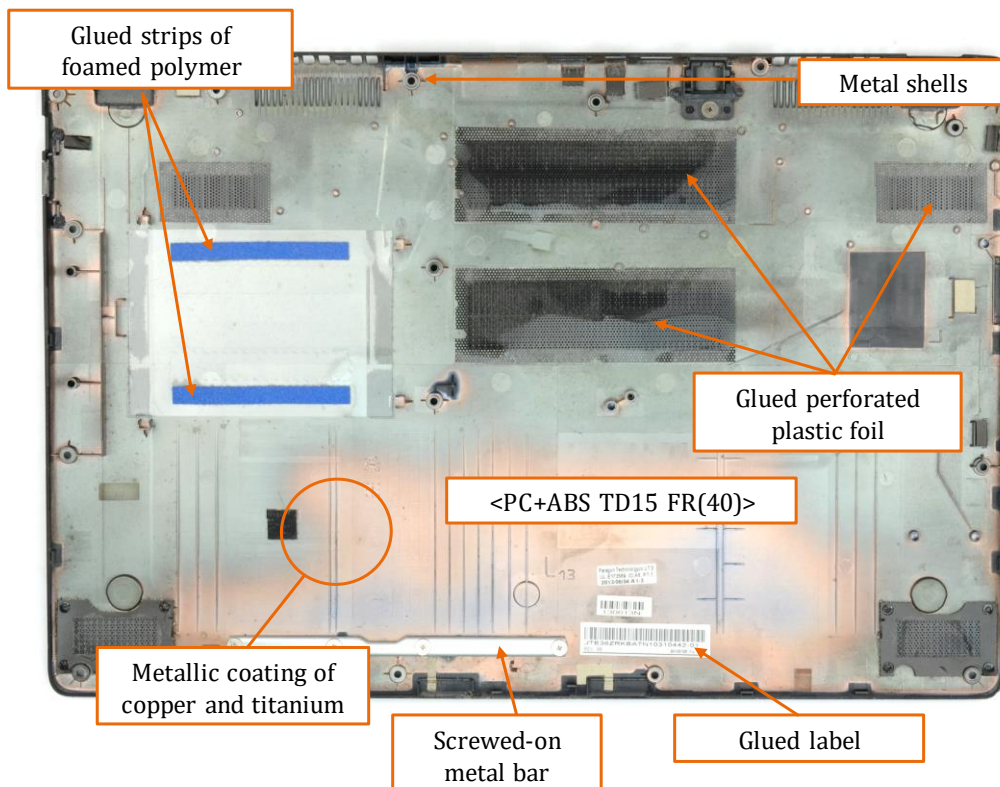


Source: Own illustration, Technische Universität Berlin

After loosening 17 screws (left), the bottom of the housing could be separated from the device to grant access to the main electronic components. One of the screws was covered by a sticker and was therefore not immediately visible. The battery pack of DUT\_2 could be removed from the device after releasing the marked connector (right).

The housing of notebooks is made up of complex material composites. Housing plastics represent a mass fraction of almost 40 percent on average in the sampled notebooks. However, at the present time, the potential to significantly increase the recyclability by means of ecodesign requirements is estimated to be low, particularly due to the complexity of materials shown in Figure 5. However, the complexity is required to warrant functions such as thermal management of the electronics inside the device.

Figure 5: Illustration of the material composition of a notebook housing part



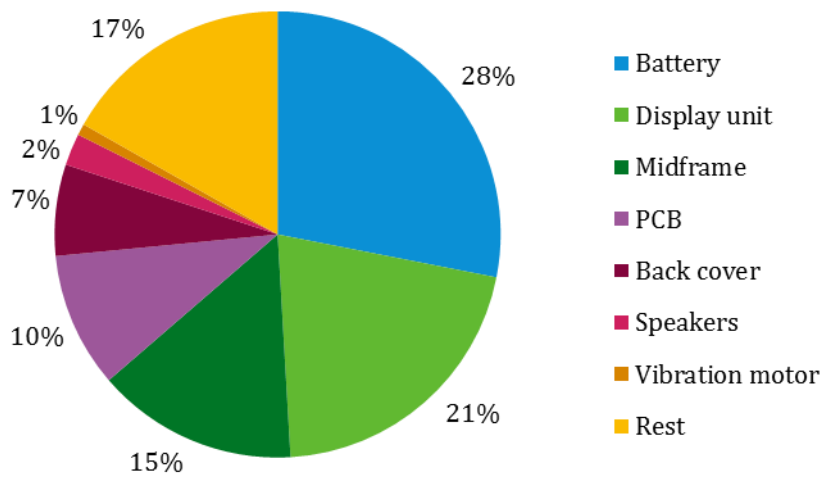
Source: Own illustration, Technische Universität Berlin

The focus in the development of product design requirements was primarily on the accessibility of rechargeable batteries. These contain a considerable amount of the investigated target substances, particularly cobalt and copper. Furthermore, some notebook components have the potential for reuse, especially the memory and mass storage, which should also be reflected in design requirements (concrete requirements are further elaborated on below).

### Case study 2: Smartphones

Figure 6 shows the average composition of the sampled smartphones. The total mass of the average smartphone is 140 grams. The battery has the highest mass share with 28 percent, followed by the display unit with 21 percent. The printed circuit boards occupy an average of 10 percent of the total weight.

Figure 6: Average mass fractions of the major smartphone components

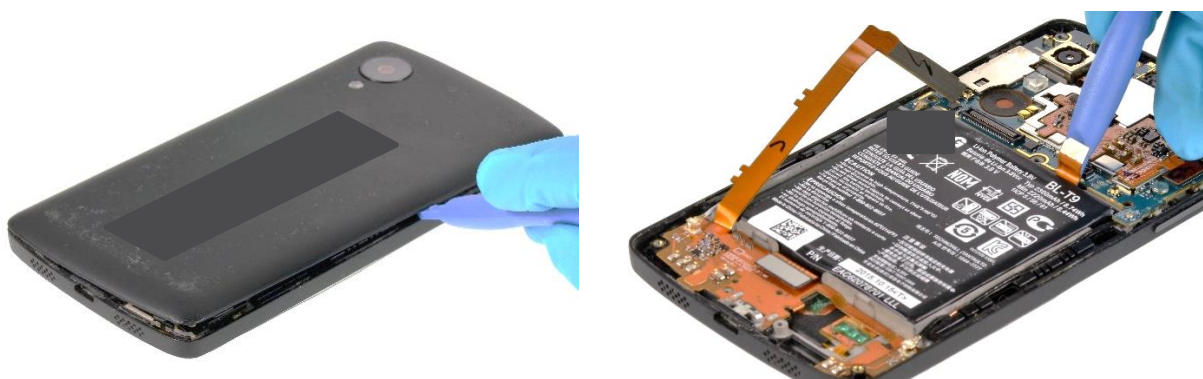


Source: Own diagram, Technische Universität Berlin

Three of the examined devices featured manually removable batteries and six had an integrated battery. For manually removable batteries, the process can be performed in a few seconds. For devices with integrated batteries, the effort and the time required varies considerably.

To remove any components, the housing must first be opened. Depending on the design of a specific device, this is done either by first separating the display or by first detaching the back cover. The separation of the display as a first step in the dismantling potentially simplifies repair projects (the display is the most frequently damaged component), but may complicate the replacement of batteries, as the display can be damaged relatively easily during the process. Separation of the back cover is achieved by loosening screws, clips, adhesive bonds, or a combination thereof. Screws are usually easy to loosen, but in some cases screws were used with uncommon (proprietary) heads. Sometimes the material of screws is too soft to be used for a second screwing operation (e.g. during re-assembly). Some clips are easy to release manually, while some are more difficult to remove even using tools. Some adhesives can be dissolved using low heat input, others require significantly higher heat input. Hence, a general assessment of the joining techniques against their influence on the recycling process is not possible at this point.

Figure 7: Removal of an integrated battery from DUT\_9

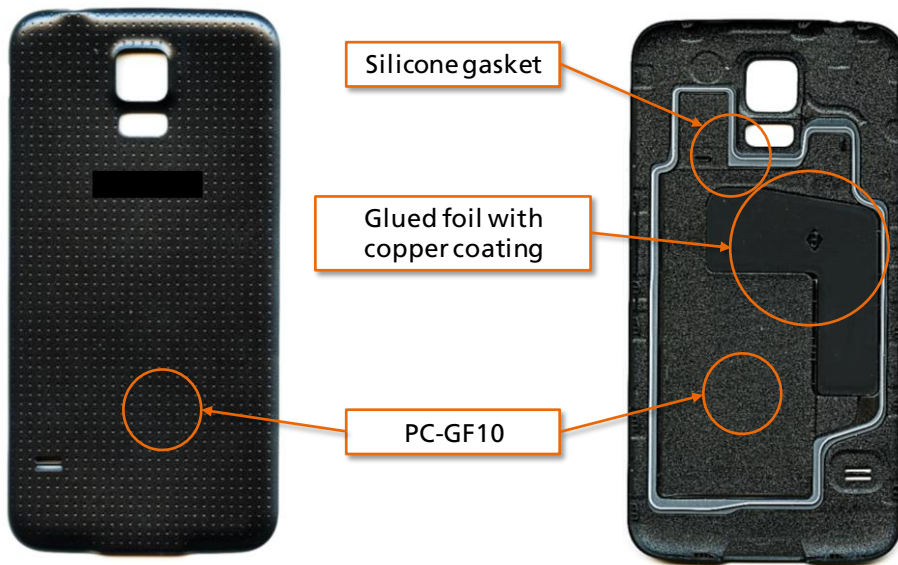


Source: Own illustration, Technische Universität Berlin

The separation of the back cover in this case required the use of a prying tool (left). The removal of the battery required the same tool (right). The combination of soft pouch cell, the use of adhesive underneath, and the magnesium frame surrounding the cell made the process difficult to carry out.

The back covers of all examined smartphones are composites of several materials. Plastic back covers often use polycarbonate (PC). However, it is usually not a mono material, as exemplarily shown in Figure 8. The glass fibre reinforcement of the base polymer, in combination with cohesively bonded materials such as silicone or rubber coatings, are generally indicators for poor recyclability.

Figure 8: Illustration of the material composition of a smartphone back cover made of plastic



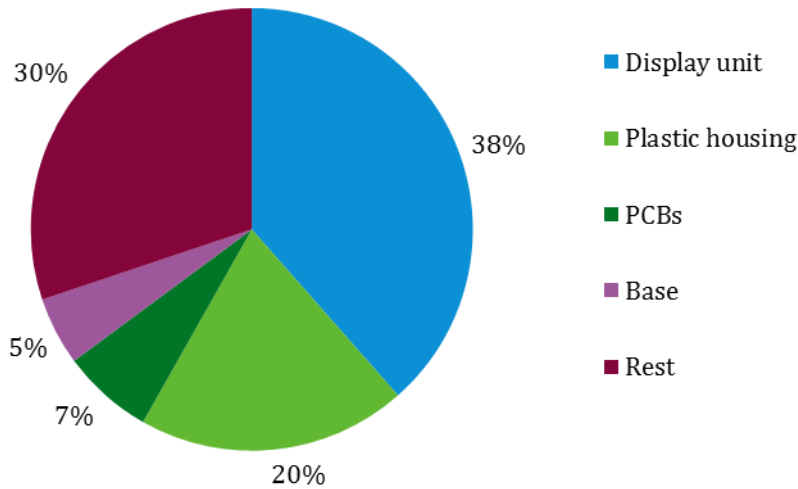
Source: Own illustration, Technische Universität Berlin

Regarding the durability and longevity of smartphones, the protection against dust and water ingress is a significant factor that may conflict with design decisions that allow for easy disassembly. Consideration must be given towards the question of which aspect should be treated with priority, particularly when discussing design requirements set by product-level policy instruments.

### Case study 2: Flat Screen TVs

Figure 9 shows the average mass fractions of major components of the examined flat screen televisions. On average, the display unit accounted for around 38 percent of the total mass. The plastic housing averaged at around 20 percent. The printed circuit boards (PCBs) made up around 7 percent of the total mass on average. The base (stand) made of plastic was responsible for an average of 5 percent.

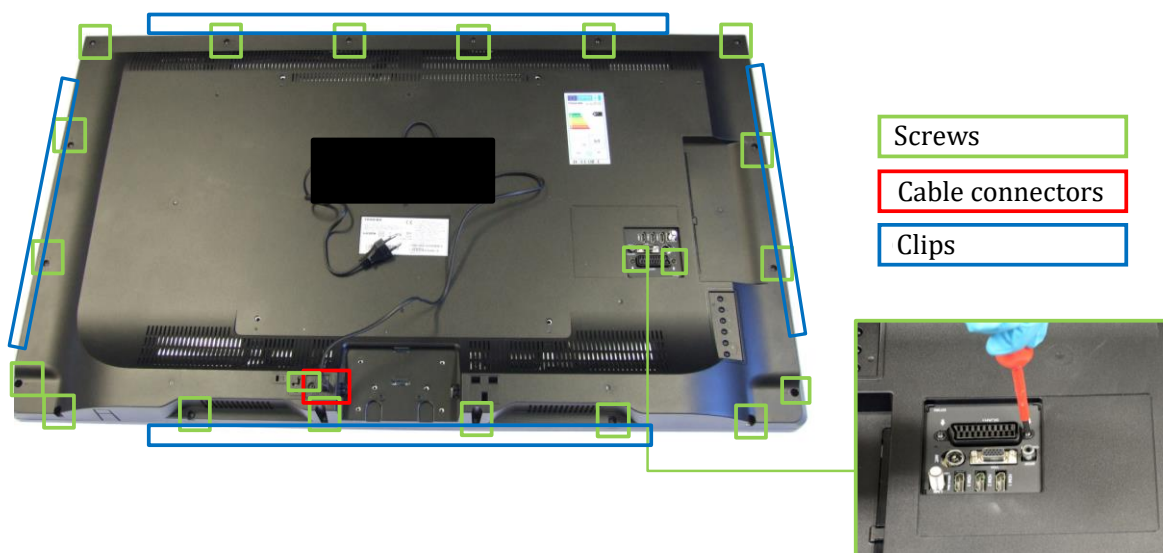
Figure 9: Average mass fractions of the major flat screen TV components



Source: Own diagram, Technische Universität Berlin

In order to disassemble the TV sets, the back panels had to be separated first. For this purpose, the release of several screws and clips was required. Based on the examined sample, adhesives are not commonly used to join housing elements. The back panels are large parts made from plastics, which are separated in one piece in the process. According to the plastics marking, flame retardants are used in most housing parts. Therefore, material recycling can only take place if recycling processes for flame retardant-added plastics are available. Furthermore, glass fibre reinforcements of polymers are common, particularly in the front frame around the display unit. These make the equipment potentially more robust, but also inhibit plastics recycling, as it is understood no industry-scale processes for recycling of such materials are currently in place.

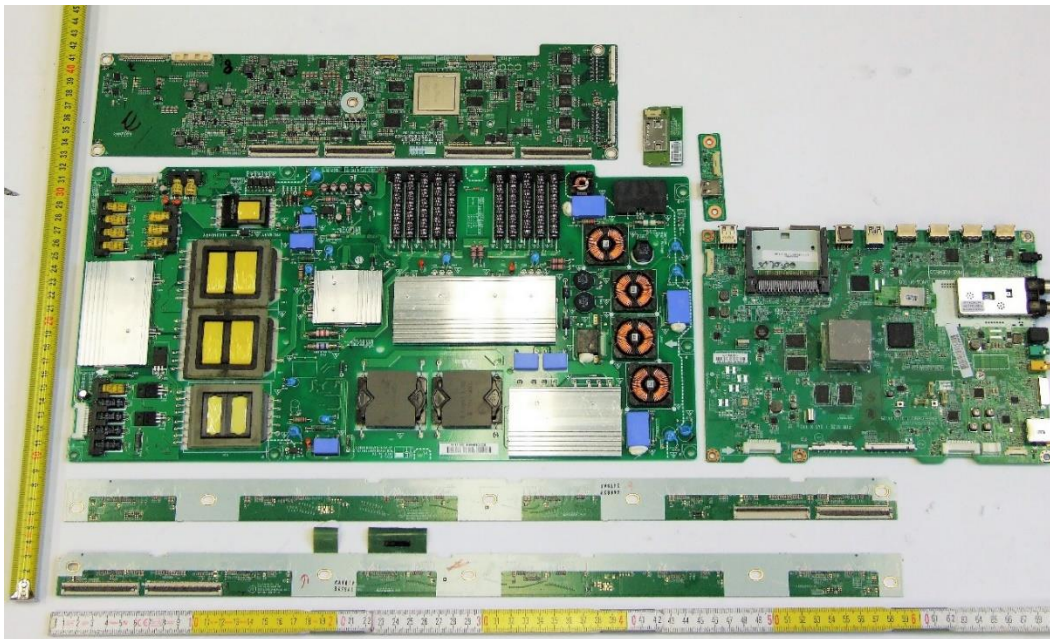
Figure 10: Illustration of the work steps required for opening the back cover of an LCD TV



Source: Dimitrova, o.J.

The printed circuit boards are of relevance for material recycling in terms of their area and mass. Good separability should be provided for in the product design or be addressed by appropriate requirements towards the pre-treatment processes.

Figure 11: Printed circuit boards from the OLED-TV

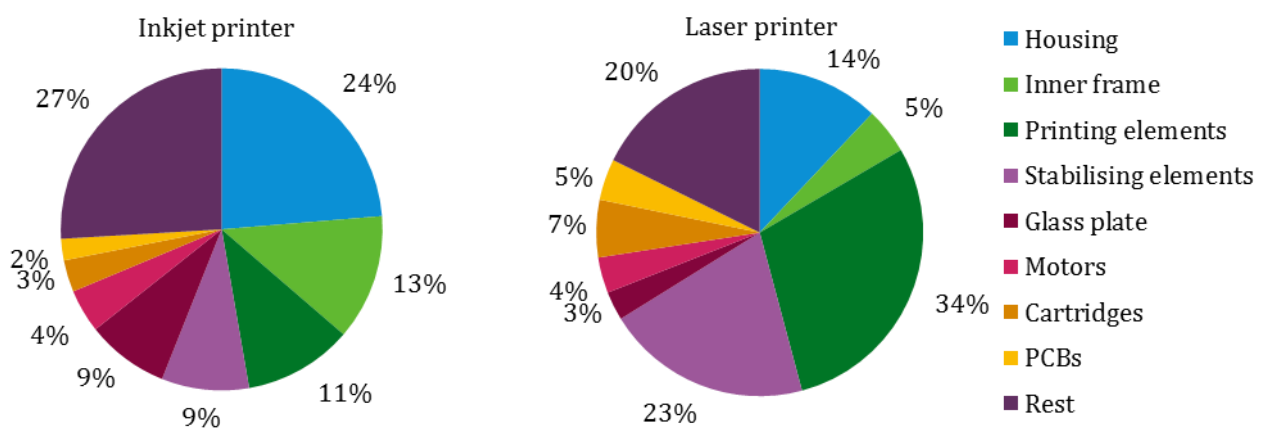


Source: Dimitrova, o.J.

### Case study 3: Desk printers

Figure 12 shows the average composition of the examined inkjet and laser printers at the component level. The total mass of the average inkjet printer was 7.8 kg, while the average laser printer was significantly heavier at 22.8 kg.

Figure 12: Average mass fractions of the major components of the examined desktop printers, subdivided into inkjet and laser printers



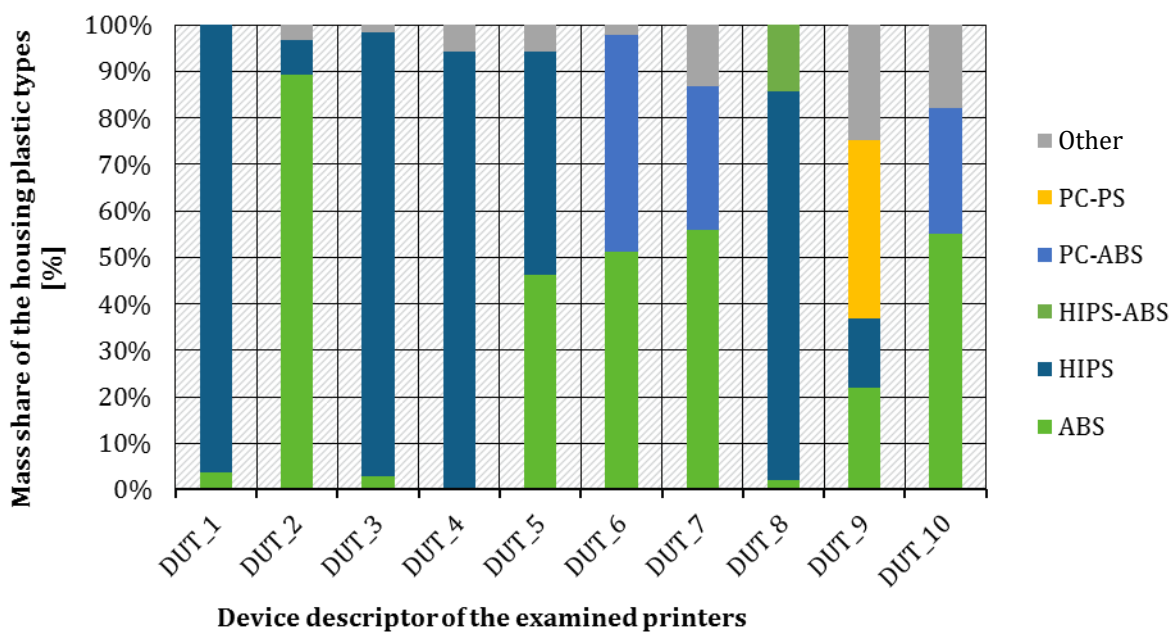
Source: Own diagram, Technische Universität Berlin

With inkjet printers, large plastic components account for around 37 percent of the total mass (sum of housing and inner frame, without cartridges and other plastic parts). The printed circuit boards account for only 2 percent of the total mass. In laser printers, metals have a significantly higher mass fraction when compared to inkjet printers. In particular the stabilizing elements made of ferrous metals make up a considerable proportion, with around 23 percent by mass. The printed circuit boards make up a larger share of the total in comparison PCBs in inkjet printers and account for five percent by mass.

Printers are significantly more complex and varied in their internal structure compared to the other product groups investigated in this study. This is in part due to the movable components responsible for moving paper through the device and for the control of the printing units. The dismantling of ten devices revealed that a generally applicable sequence of disassembly steps cannot be defined. Due to the large number of different product features and functions, the structure of printers and their components varies much more than, for example, in the examined notebooks.

An important finding in the identification of plastic types is that, in case of ink jet printer housing elements, most often HIPS or ABS are used as the only polymer in some devices, while parts made from HIPS and ABS were found in other devices. Only minor amounts of other plastic types were found in those parts. Furthermore, according to the plastic type markings, no flame retardants were used in the housing parts of the examined devices. For laser printers, the variety of plastic types was higher and flame retardants were use in most large plastic components.

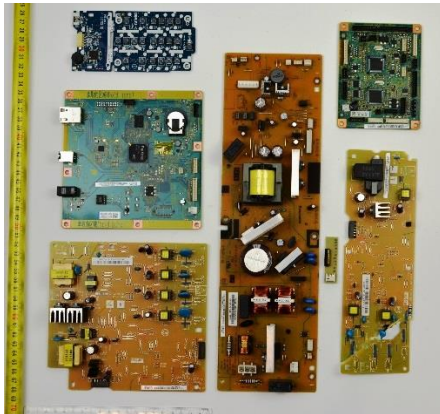
Figure 13: Mass share of the printer housing plastic types according to their markings



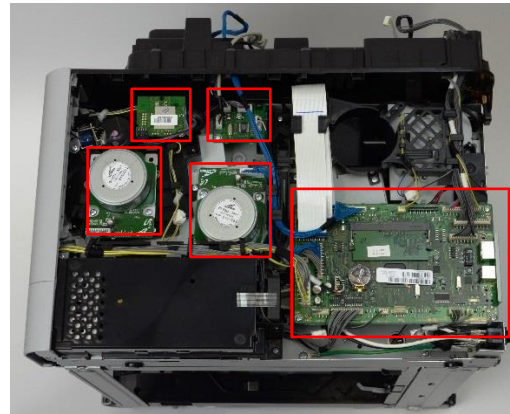
Source: Own diagram, Technische Universität Berlin

Relative to the total device mass, the mass of printed circuit boards installed in the examined inkjet printers is relatively small. Removing all printed circuit boards was a time-consuming process, as they are generally connected with many components and not easily accessible. The mass and area of laser printers was comparatively higher, but PCBs are still distributed within the device (Figure 14).

Figure 14: Separation of the printed circuit boards of two laser printers



DUT\_7: All PCBs, with scale



DUT\_8: Side view; positioning of various PCBs in the device

Source: Own illustration, Technische Universität Berlin

The comparatively high plastic content of printers should be the focus of potential ecodesign requirements. Furthermore, copper from the printed circuit boards and electric motors may be interesting due to their relatively high amounts in printers.

### Summary of findings from Part I

The significance of the respective product groups in the recycling process was evaluated by the potential mass of target materials in recycling processes in chapter 3.1.2. For the examined product groups, flat screen televisions, followed by notebooks and smartphones, have been identified to have the greatest recycling potential for precious and special metals (except cobalt). Taking into account the expected increases in the potential numbers of flat screen televisions and smartphones in the future recycling processes, one can expect a growing importance of these product groups in the recycling processes. With respect to the case studies selected in this project, cobalt is predominantly used for the cathodes in portable batteries. Accordingly, cobalt recycling for notebooks, as well as smartphones, offers the greatest potential for material recycling among the product groups examined in terms of available mass.

For the recycling of plastics, flat screen televisions and desktop printers are of particular importance among the examined case studies. The high amounts of plastic housing in combination with the comparatively low material diversity reinforce this assessment. Extrapolating from the examined notebooks, similar amounts of plastic may be expected in future recycling processes. However, according to the current state of the art in plastics recycling technologies, these cannot be recovered as secondary materials due to a high degree of material diversity, including metal coatings, inclusions of solid metal parts, flame retardants, stickers and labels, and various coatings.

### Part II: Removability and durability of device batteries

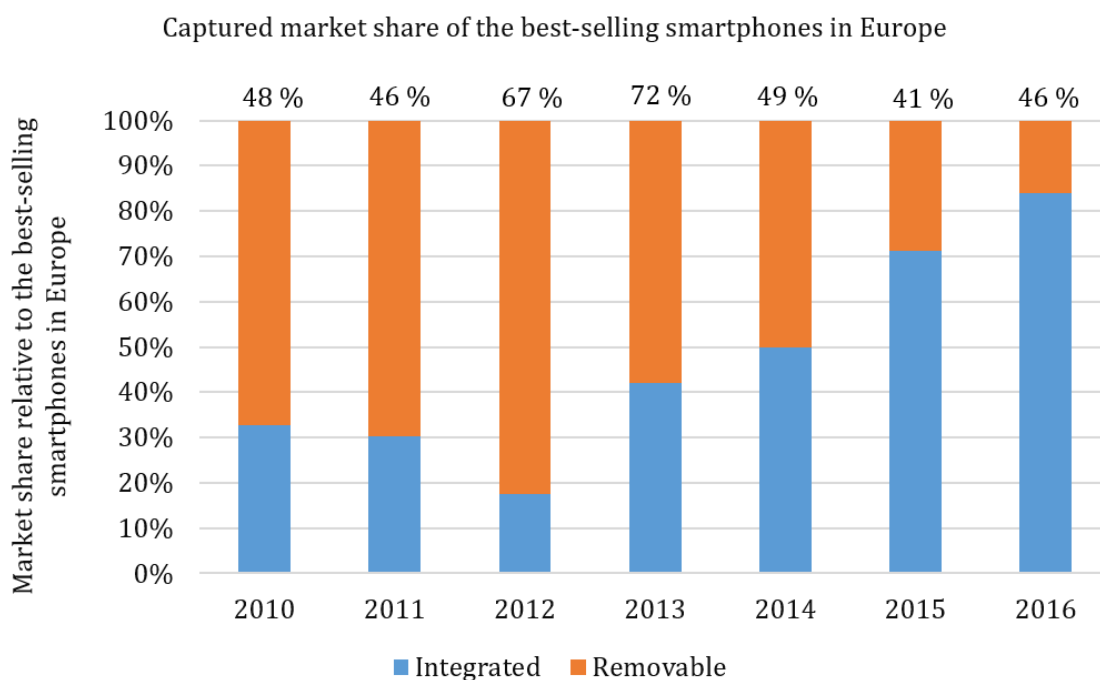
In many electrical and electronic devices, the rechargeable battery is one of the key components in terms of environmental impact. Due to the often more limited lifetime of batteries compared to the battery-powered device, the total environmental balance can be significantly influenced. To that end, it is advantageous for batteries to be easily replaceable so that the end of life of a battery does not necessarily lead to an early disposal of the entire device. This potentially enables a longer service life of the battery-powered device and thus serves the goal of environmental protection and resource conservation. Furthermore, a high degree of removability of batteries from WEEE must be warranted so that the statutory separation of batteries from such equipment at the end of the use phase can take place in pre-treatment plants.

One goal of this work package was to develop proposals for requirements for battery-powered products under the Ecodesign Directive. The following four product groups were selected as case studies in the research project:

- ▶ Notebooks
- ▶ Smartphones
- ▶ E-Book-Reader
- ▶ Electrical toothbrushes

The trend towards the integration of rechargeable batteries in smartphones has been demonstrated by evaluating the removability of batteries from smartphones with high market shares over the past few years (Figure 15). Market data on Europe's top-selling smartphones (Counterpoint Research 2017) was combined with data on the removability of the battery for each model. Data for the years 2010 to 2016 indicate that the share of smartphones with a battery removable by the user without the use of tools is steadily declining since 2012. Signs of a reversal of this trend have not been observed at the time of writing.

Figure 15: Development of the removability of rechargeable batteries from the best-selling smartphone models between 2010 and 2016, based on data from Counterpoint Research



The diagram includes market data from the best-selling smartphone models per year in Europe. The number of different smartphone models included in the data in each year ranged from 16 (in 2010) to 25 (in 2016). The sum of the market share of these models across the European market is indicated above the data columns and varies between 46 and 72 percent. Data on the other sold smartphone models and their design in terms of battery removability were not available.

Source: Own illustration, Technische Universität Berlin

To name a second example, in eight of the 11 models of the electric toothbrushes examined, the integrated battery inside the device was soldered directly onto the circuit board. Two other models could not be opened nondestructively. One model was powered by a removable, primary battery. The non-representative sample of toothbrush models examined in this study indicates that soldering the battery in toothbrushes with non-removable batteries is common practice.

### **Part III: Development of product design requirements**

Based on the findings of the previous chapters, design requirements are formulated for the product groups examined, as well as cross-product group requirements in chapter 5. For each suggested design requirement, the expected relevance, effectiveness and feasibility are assessed. Chapter 6 contains recommendations for action in the form of a list of essential requirements for each case study. In this summary chapter, the requirements cannot be summarized in detail to include justifications and evaluations for each suggested requirement. Therefore, only the thematic focus of the recommendations or each case study is summarized below.

#### **Essential recommendations for notebooks**

For notebooks, the removability of the rechargeable batteries during pre-treatment is in focus. Several options for requirements were developed to simplify the removability and thus to allow batteries to be treated in a dedicated battery recycling plant. No requirements were developed regarding the design of the printed circuit boards as they are considered to be a significant economic driver of recycling activities in general and are thus highly likely to find their way into dedicated recycling processes without additional design requirements. The recyclability of the plastic housing is currently considered to be low and the use of materials with a higher recyclability should be encouraged. The recycling of indium from displays is currently considered to be more promising for flat screen televisions than for laptops due to expected higher mass flows due to larger panel sizes. The market share of notebooks with hard disk drives is decreasing and thus regulation of product design is not considered an effective means to improve the recyclability of neodymium from HDD. The removability of components that are suitable for reuse, such as mass storage and memory, should be fostered by appropriate requirements. Data on mass storage units should be irrevocably erasable.

#### **Essential recommendations for smartphones**

From a life cycle assessment perspective, the extension of the useful life of smartphones should be the priority. Replaceability of components is seen as an essential factor that can promote the extended use of smartphones. In terms of end-of-life considerations it is recommended to use reversible joining techniques only to facilitate the removal of recycling-relevant components. This also applies to the removability of rechargeable batteries in the pre-treatment processes. Analogous to notebooks, it is believed that the printed circuit boards are an essential economic driver of recycling activities and usually reach their proper recycling path. Thus, separability does not have to be regulated by ecodesign requirements.

#### **Essential recommendations for flat screen televisions**

In the case of flat screen televisions, it is proposed that the disassemblability of devices should be increased on the one hand, and that requirements should improve the treatment of the devices in the recycling process on the other hand. Easy disassembly of the back panel allows for quick access to the PCBs and potentially the display unit. Furthermore, requirements should facilitate the recyclability of materials, particularly housing elements.

#### **Essential recommendations for desktop printers**

For desktop printers, the recyclability of plastics and the use of secondary plastics in new printers are in the focus of developed requirements. To this end, requirements are proposed towards the choice of materials and the proportion of recycled plastics from the post-consumer sector in new appliances. Furthermore, the separability of metallic materials and plastics is to be promoted.

#### **Essential product group-unspecific recommendations**

Product group-unspecific requirements were developed that can in principle be applied to various product groups or even to all EEE. Requirements are proposed regarding:

- ▶ the removability of batteries from any (W)EEE
- ▶ the use of recycled plastics in new products
- ▶ the variety of plastics used
- ▶ the standard-compliant labelling of used plastics

- ▶ the durability of rechargeable batteries.

Furthermore, there is a need to further develop standards to address the following areas:

- ▶ Specification by the manufacturer regarding the technical lifetime of rechargeable device batteries is only comparable between different devices and manufacturers if uniform definitions for test parameters are specified when measuring the charge/discharge cycle stability according to standard EN 61960. These parameters include, among others, charging regimes and voltage limits. These need to be designed as close as possible to the actual use scenarios and individually for each product group. At minimum, the transparency of applied test parameters must be warranted. It is proposed to aim for a corresponding standardization mandate.
- ▶ A recyclability rate is considered to be potentially useful, however, a revision of the standard IEC 62635 is required. Corresponding work is currently in progress (including standardization mandate M/543 and technical literature (Chancerel and Marwede 2016)).
- ▶ It is recommended to develop a classification of reversible and irreversible (permanent) joining techniques within the framework of standardization, with a particular focus on various adhesives applied in product design.

## 1 Hintergrund und Ziele des Vorhabens

Elektro- und Elektronikaltgeräte (EAG) spielen mit rund 723.000 gesammelten Tonnen im Jahr 2014 (Umweltbundesamt 2017a) und ihrem hohen Anteil an preisintensiven und seltenen Werkstoffen eine wichtige Rolle in den Recyclingbestrebungen der Bundesrepublik Deutschland. Bei einer durchschnittlich inverkehrgebrachten Menge an Elektro- und Elektronikgeräten (EEG) von rund 1.685.000 Tonnen in den Jahren 2011 bis 2013 (Umweltbundesamt 2017a) entspricht das nach derzeitigem europäischen Recht (Europäische Kommission 2012) einer Sammelquote von rund 43 Prozent. 2015 betrug die Sammelquote 42,5 Prozent bei einer gesammelten Menge von 722.000 Tonnen EAG<sup>2</sup>.

Der überwiegende Einsatz von Primärrohstoffen bei der Produktion energieverbrauchsrelevanter Produkte mit komplexer Materialzusammensetzung wie bei Notebooks, Druckern und Smartphones, sowie wenig genutzte Ressourceneffizienzpotenziale durch eine Kreislaufführung der Materialien der Elektroaltgeräte werden zunehmend als problematisch betrachtet.

Die Kreislaufführung von Edelmetallen und Sondermetallen sowie Kunststoffen in EEG weist bis heute große Defizite auf. Die Gründe hierfür sind vielschichtig und erstrecken sich von am Produkt determinierten Ursachen, technologiebasierten Herausforderungen bis hin zu Marktversagen. Generell kommen Edelmetalle und Sondermetalle in EEG in sehr geringen Konzentrationen zum Einsatz, während Kunststoffe je nach Produktgruppe den größten Gewichtsanteil vom Produkt ausmachen können. Die untersuchten Edelmetalle und Sondermetalle liegen im Produkt oft nicht in Reinform vor, sondern chemisch gebunden oder in komplexen Bauteilen mit großer Materialvielfalt (Angerer et al. 2009; Reuter et al. 2013; Chancerel und Rotter 2009; Chancerel et al. 2011). Insbesondere die Gemische in ihre einzelnen Bestandteile zu zerlegen, scheitert heute noch häufig am Fehlen technologischer Prozesse. Wo es hingegen schon heute technologisch möglich wäre, scheitert es nicht selten an der Diskrepanz zwischen ökonomischem Aufwand und Erlös (Chancerel 2010b; Chancerel et al. 2009).

Da für viele EAG die Wiedereinbringung der eingesetzten Materialien in den Rohstoffkreislauf bislang Ineffizienzen aufweist, können Maßnahmen für eine materialeffiziente und abfallvermeidende Produktgestaltung einen signifikanten Hebel zur Steigerung der Ressourceneffizienz sowie der Reduktion von bei der Produktion entstehenden Umweltauswirkungen darstellen.

### 1.1 Zielsetzung und Aufgaben

Ziel des Vorhabens ist es, Potenziale zur Material- und Rohstoffeinsparung im Produktbereich zu identifizieren sowie Handlungsempfehlungen zur Weiterentwicklung von produktpolitischen Instrumenten zu formulieren, um so insgesamt zu einer Reduktion der Ressourceninanspruchnahme beizutragen. Um eine materialeffiziente und abfallvermeidende Produktgestaltung zu erreichen, fokussiert das Forschungsvorhaben die verbesserte Kreislaufführbarkeit ökologisch kritischer Materialien. Weiterhin werden weitere Aspekte der Kreislaufwirtschaft betrachtet, beispielsweise Produktlebensdauer, Reparierbarkeit und Ersatzteilverfügbarkeit, Steigerung der Wieder- und Weiternutzung und der vermehrte Einsatz von Recycling- und Sekundärmaterialien.

Zur Erreichung dieses übergeordneten Ziels wurden die folgenden Arbeiten durchgeführt:

- ▶ Evaluation von Normen und Bewertungssystemen hinsichtlich der Inhalte Produktlanglebigkeit, Reparierbarkeit und Recyclingfähigkeit, um Handlungsempfehlungen für produktpolitische Instrumente abzuleiten.
- ▶ Zusammentragen von relevanten Projekterkenntnissen jüngst und aktuell durchgeführter Forschungsvorhaben mit der Fragestellung, wie Edelmetalle und Sondermetalle sowie Kunststoffe aus Elektro- und Elektronikaltgeräten zurückgewonnen werden können.

---

<sup>2</sup> <https://www.umweltbundesamt.de/themen/abfall-ressourcen/produktverantwortung-in-der-abfallwirtschaft/elektroaltgeraete#textpart-1>

- ▶ Durchführung von Expertenbefragungen mit Produktherstellern, Reparaturbetrieben und Betreibern von Behandlungs- und Recyclinganlagen, um Erkenntnisse darüber zu gewinnen, wie Design, Aufbau, Verbindung und Beschaffenheit von Produkten vorgenommen werden müssten, um eine verbesserte Recyclingfähigkeit gewährleisten zu können.
- ▶ Entwicklung von Handlungsempfehlungen für vier Produktgruppen: Notebooks, Smartphones, Flachbildschirmfernseher und Drucker.
- ▶ Evaluation und Beschreibung, welche der möglichen Anforderungen für welches der produktpolitischen Instrumente Ökodesign-Richtlinie, Produktkennzeichnung (verpflichtende EU-Energieverbrauchskennzeichnung), freiwillige Umweltzeichen (Blaue Engel, EU-Umweltzeichen, etc.) sowie Anforderungen für die umweltfreundliche öffentliche Beschaffung geeignet sind.
- ▶ Durchführung eines Workshops mit Akteuren, insbesondere Produktherstellern, Reparaturbetrieben sowie Betreibern von Behandlungs- und Recyclinganlagen, um die Erkenntnisse der Expertenabfragungen und Interviews vor dem Hintergrund der Fragestellung einer verbesserten Recyclingfähigkeit (aber auch Produktlanglebigkeit und Reparierbarkeit) zu diskutieren.
- ▶ Erstellen einer Bestandsaufnahme, bei welchen Produktgruppen die Entnehmbarkeit des Akkus durch den Endnutzer oder Fachservice möglich und sinnvoll ist und welche Ausnahmen notwendig sind.
- ▶ Erarbeiten von Vorschlägen für erweiterte Anforderungen zur Funktionalität von Gerätebatterien und ihrer Entnehmbarkeit aus funktionsfähigen Geräten und/oder Entfernbarkeit aus Altgeräten im Rahmen von Durchführungsmaßnahmen unter der Ökodesign-Richtlinie.
- ▶ Begleitung von EU-Studien und Ableitung von Handlungsempfehlungen, insbesondere Aktivitäten des Joint Research Centre (JRC) hinsichtlich der Methodenentwicklung zur Bestimmung von für die Ressourceneffizienz relevanten Parametern.
- ▶
- ▶ Das Vorhaben gliedert sich in vier Arbeitspakete (AP):
- ▶
- ▶ AP 1: Informationen und Normen zu Reparierbarkeit, Demontage und Berechnung der Recyclingfähigkeit
- ▶ AP 2: Verbesserung der Kreislaufführbarkeit von Edel- und Sondermetallen und Kunststoffen
- ▶ AP 3: Konkretisierung der Anforderungen an die Entnehmbarkeit von (Batterien und) Akkumulatoren
- ▶ AP 4: Begleitung von EU-Studien

Dieser Bericht ist nicht strikt anhand der vier Arbeitspakete strukturiert. Der inhaltliche Schwerpunkt liegt auf den Arbeitspaketen 2 und 3. Diese sind im Bericht ausführlich in den Kapiteln 3 und 4 dargestellt und münden in der Ableitung von Designanforderungen in Kapitel 5. Aus der Unterscheidung der Zielsetzungen der AP 2 und 3 leitet sich auch die Abgrenzung der Fallstudien in den Kapiteln 3 und 4 ab, da der Fokus im AP 3 ausschließlich auf den Gerätebatterien lag. Aufgrund sich überschneidender Fallstudien tauchen aus diesem Grund Notebooks und Smartphones in beiden Kapiteln als Fallstudie mit gleicher Nummerierung auf. Die untersuchten Produktgruppen im Forschungsvorhaben sind:

- ▶ Fallstudie 1: Notebooks (Kapitel 3.4 und 4.4)
- ▶ Fallstudie 2: Smartphones (Kapitel 3.5 und 4.5)
- ▶ Fallstudie 3: Flachbildschirmfernseher (Kapitel 3.6)
- ▶ Fallstudie 4: Schreibtischdrucker (Kapitel 3.7)
- ▶ Fallstudie 5: E-Book-Reader (Kapitel 4.6)
- ▶ Fallstudie 6: Elektrische Zahnbürsten (Kapitel 4.7)

Ergebnisse aus der Analyse und Bewertung des Normengerüsts in Arbeitspaket 1 flossen im Rahmen der Laufzeit des Forschungsvorhabens in die Arbeit des DIN KU-Themenschwerpunkt „Nachhaltige

Produktgestaltung/Abfallvermeidung“ ein. In Erwartung erster Ergebnisse des Normungsmandates M/543<sup>3</sup> wurden die Arbeiten im AP 1 nicht weiter vertieft. Ähnlich wurde mit der Begleitung von EU-Studien im Arbeitspaket 4 verfahren. Die erarbeiteten Ergebnisse dienen der Information des Auftraggebers während der Projektlaufzeit. Die zugehörigen Kapitel sind daher diesem Bericht lediglich als Anhänge beigelegt (siehe Kapitel 9.2 und Kapitel 9.3).

## 1.2 Herangehensweise

Um den Erkenntnisgewinn, unter den abgesteckten Rahmenbedingungen des Forschungsvorhabens möglichen, zu maximieren, wurden mehrere parallele Ansätze verfolgt.

In Demontageversuchen anhand Stichproben konnte das Produktdesign marktaktueller Geräte erfasst werden. Dazu konnten zwischen neun und 41 Geräten je untersuchter Fallstudie (Produktgruppe) beschafft werden. Die Demontagen erfolgten möglichst zerstörungsfrei um das Produktdesign zu studieren. Die Demontageschritte wurden tabellarisch sowie fotografisch dokumentiert und ausgewertet. Die Demontagen erfolgten in einer Tiefe, wie sie in der Praxis im Recyclingbetrieb aufgrund ökonomischer Erwägungen i.d.R. nicht durchgeführt werden können. Markennamen und ähnliche Hinweise auf einzelne Hersteller wurden in der Dokumentation der Demontagen anonymisiert, da es nicht Ziel des Vorhabens war, einzelne Hersteller miteinander zu vergleichen. Vielmehr war das Ziel, aus Sicht der Ressourcenschonung besonders positive oder negative Designmerkmale zu identifizieren.

Als weitere Informationsquelle sowie zur Absicherung erlangter Erkenntnisse wurde ein Begleitkreis für die Laufzeit des Vorhabens ins Leben gerufen. Teilnehmer wurden dazu aus den Bereichen der Recycling- und Reparaturpraxis, der Gerätehersteller, sowie Wissenschaft, Behörden und Non-Profit-Organisationen eingeladen. Insgesamt beteiligten sich 41 Organisationen aktiv am Projekt.

- ▶ Erstbehandlung, Recycling, Reparatur: 13 Teilnehmer
- ▶ Hersteller, Industrie, Verbände: 9 Teilnehmer
- ▶ Produktdesign, Beratung: 7 Teilnehmer
- ▶ Wissenschaft, Forschung, Behörden: 10 Teilnehmer
- ▶ Projektbegleitung: 2 Teilnehmer

Die Aktivitäten des Begleitkreises setzten sich aus insgesamt drei durchgeführten Telefonkonferenzen, einem ganztägigen Workshop, teilstrukturierten Interviews, Betriebsbesichtigungen, persönlichen Gesprächen und einer halbtägigen Abschlussveranstaltung zusammen. Die Erkenntnisse fließen in alle Abschnitte dieses Berichts mit ein. Eine Teilnahme am Begleitkreis bedeutet jedoch nicht, dass alle Mitglieder alle Befunde und Empfehlungen in diesem Dokument unterstützen. Die Diskussion der Ergebnisse im Rahmen der Abschlussveranstaltung gibt das differenzierte Meinungsbild der teilnehmenden Mitglieder des Begleitkreises zu den Ergebnissen des Forschungsvorhabens wieder (siehe Protokoll im Anhang, Kapitel 9.4).

---

<sup>3</sup> Durchführungsbeschluss der Kommission vom 17.12.2015 über einen Normungsauftrag an die europäischen Normungsorganisationen im Hinblick auf die umweltgerechte Gestaltung in Bezug auf Aspekte der Materialeffizienz bei energieverbrauchsrelevanten Produkten zur Unterstützung der Umsetzung der Richtlinie 2009/125/EG des Europäischen Parlaments und des Rates (C(2015) 9096 final).

## 2 Begriffsbestimmungen

Acrylnitril-Butadien-Styrol (ABS)	Acrylnitril-Butadien-Styrol (ABS) ist ein thermoplastisches Copolymer der aus den drei Monomeren Acrylnitril, 1,3-Butadien und Styrol durch Polymerisation in variierender Zusammensetzung hergestellt werden kann.
Batterie	Vorrichtung zur Umwandlung von chemischer in elektrische Energie, sowie der Bereitstellung elektrischer Energie zur Versorgung eines externen Stromverbrauchers. Kommerziell genutzte galvanische Zellen (Batterien, Zellen) werden in Primärzellen (einmal nutzbar) und Sekundärzellen (wieder aufladbar) unterteilt.
Copolymer	Copolymere sind Polymere, die aus mindestens zwei verschiedenen Monomeren bestehen, die durch Polymerisation synthetisiert werden.
Edelmetall	Als Edelmetalle werden Metalle bezeichnet, die sich durch eine hohe Korrosionsbeständigkeit auszeichnen und in natürlicher Umgebung unter Einwirkung von Wasser und Luft dauerhaft chemisch stabil sind. Zu ihnen werden klassischerweise Gold, Silber und die Platinmetalle gezählt. Obwohl Kupfer zu den Halbedelmetallen zählt, fällt es in diesem Bericht in die Gruppe der Edelmetalle (in Abgrenzung von Sondermetallen und Kunststoffen).
High-Impact-Polystyrol (HIPS)	High-Impact-Polystyrol (HIPS), oder auch schlagzähes oder schlagfestes Polystyrol genannt, ist ein Styrol-Butadien Copolymer. Es wird aus einer Polystyrol-Phase und einer darin dispergierten Kautschuk-Phase aufgebaut. High-Impact-Polystyrol (HIPS) ist ein Thermoplast mit, im Vergleich zum Standard Polystyrol, nur leicht verminderter Steifigkeit, aber deutlich erhöhter Schlagzähigkeit.
Monomer	In der Polymerchemie und bei der Herstellung von Kunststoffen sind Monomere alle chemischen Verbindungen, die durch Polymerisation Polymere bilden können.
Polymer Kunststoff Plastik	Als Polymer werden Makromoleküle bezeichnet, die durch Polymerisation aus einer oder mehreren Struktureinheiten (Monomeren), den konstitutionellen Repetiereinheiten, entstehen. Oft werden Kunststoffwerkstoffe übergeordnet als Polymere oder Polymerwerkstoffe bzw. umgangssprachlich als Plastik bezeichnet.
Polymerblend	Polymerblends (Polymerlegierungen) werden durch Mischen von mindestens zwei verschiedenen, ineinander löslichen Polymeren oder Copolymeren erzeugt.
Polystyrol (PS)	Polystyrol wird durch die Polymerisation von Styrol (Phenylethen) als teilkristalliner oder amorpher Kunststoff hergestellt und findet breite Anwendung in der Herstellung von Kunststoffbauteilen. Poly-

	styrol wird in geschäumter Form (expandiertes und extrudiertes Polystyrol) ebenfalls in großem Umfang in der Verpackungsindustrie und als Dämmstoff eingesetzt.
Polycarbonat (PC)	Polycarbonat ist ein thermoplastischer und transparenter Kunststoff aus der Gruppe der Polyester.
Polyethylen (PE)	Polyethylen (PE) ist ein teilkristalliner Thermoplast aus der Gruppe der Polyolefine. Polyethylen zeichnet sich durch seine hohe chemische Beständigkeit aus und findet in großem Maßstab Anwendung für Verpackungen.
Polypropylen (PP)	Polypropylen (PP) ist ein in großem Maßstab eingesetzter thermoplastischer Kunststoff aus der Gruppe der Polyolefine.
Poly(methyl-2-methacrylat) (PMMA) Acrylglas, Plexiglas	Polymethylmethacrylat (PMMA, Plexiglas) ist ein transparenter thermoplastischer Kunststoff. PMMA wird in großem Maßstab unter anderem für transparente Strukturen und Verglasungen eingesetzt.
Akkumulator Akku	Galvanische Zelle die für eine begrenzte Zeitspanne und/oder Zyklenzahl wieder aufgeladen werden kann. Die Kurzform Akku hat einen umgangssprachlichen Charakter, wird aber in diesem Bericht zur besseren Lesbarkeit verwendet.
Sondermetalle	Sondermetall ist keine anerkannte Definition einer Stoffgruppe. Der Begriff wird in diesem Forschungsvorhaben genutzt, um eine einfache Abgrenzung zwischen Edelmetallen und sonstigen, aus anwendungstechnischer und recyclingtechnischer Sicht relevanten Metallwerkstoffen zu schaffen. I.d.R. werden diese z.T. auch als Technologiemetalle bezeichneten Materialien in Elektronikgeräten in geringen Mengen eingesetzt, um eine bestimmte Funktionalität elektronischer Baugruppen zu ermöglichen.
Universalwerkzeug	Unter Universalwerkzeug wird in Erstbehandlungsanlagen üblicherweise vorhandenes Werkzeug verstanden, bspw. Schraubendreher.

## 3 Teil I: Kreislaufführbarkeit von Edel- und Sondermetallen und Kunststoffen aus Elektronikgeräten

### 3.1 Einführung und Zielstellung

Die Möglichkeit, Materialien wie Edelmetalle, Sondermetalle und Kunststoffe in einem stofflichen Kreislauf zu führen, hängt von verschiedenen Faktoren ab. Nicht zuletzt zählen dazu die verfügbaren Recyclingtechnologien und die finanziellen Mittel, die der gesamten Recyclingkette zur Verfügung stehen. Aber auch das Produktdesign selbst hat einen Einfluss: Welche Vielzahl an Werkstoffen wird in welchen Kombinationen und Konzentrationen eingesetzt? Erlaubt die Konstruktion der Geräte eine Trennung der Werkstoffe, die nicht im gleichen Recyclingpfad stofflich zurückgewonnen werden können, durch verfügbare Behandlungsprozesse? Eine Schwierigkeit dabei ist, dass Ökodesign zukünftige Entwicklungen absehen muss. Dies betrifft Trends und Entwicklungen im Produktdesign, aber ebenso Entwicklungen im Bereich des Recyclings.

Kreislaufwirtschaft wird spätestens seit der Veröffentlichung des Circular Economy Action Plan der Europäischen Kommission Ende 2015 nicht mehr nur vordergründig als Recycling verstanden. Vielmehr wird Recycling als eine Möglichkeit gesehen, einen Teil des ökonomischen und ökologischen Werts von Produkten und Materialien zu erhalten. Ganz im Sinne der Abfallhierarchie gemäß § 6 des Kreislaufwirtschaftsgesetzes steht die Abfallvermeidung im Vordergrund. Diese kann beispielsweise durch eine Erhöhung der Lebensdauer von Produkten erreicht werden, beispielsweise durch die Konstruktion von besonders robusten oder reparierfähigen Geräten. Dennoch ist davon auszugehen, dass alle Geräte einmal zu Abfall werden. Dann ist es wünschenswert, dass ein möglichst großer Anteil der eingesetzten Materialien mit vertretbarem Aufwand stofflich zurückgewonnen und in einer vergleichbar anspruchsvollen Anwendung wiedereingesetzt werden kann. Aspekte des Produktdesigns, die diesen Prozess fördern oder behindern stehen im Fokus dieses Forschungsvorhabens. Dennoch werden auch andere für die Kreislaufwirtschaft relevante Aspekte mitbetrachtet. So kann sichergestellt werden, dass sich Anforderungen an die Recyclingfähigkeit von Geräten nicht kontraproduktiv auf die Lebensdauer auswirken.

Der Schwerpunkt der Arbeiten lag auf der Analyse, was die Kreislaufführung von Edel- und Sondermetallen sowie Kunststoffen bei Elektro(nik)geräten erschwert oder sogar verhindert. Ökologisches Design, insbesondere recyclinggerechtes Design, hat potenziell einen großen Einfluss auf ein positives Ergebnis bei der Kreislaufführung. Anhand marktaktueller Produkte wurde zunächst untersucht, welche Designaspekte der Kreislaufführung zu- oder abträglich sind. Die Ergebnisse wurden anschließend mit Marktteilnehmern sowie Experten des Begleitkreises diskutiert.

Um mögliche Hürden oder Potentiale bei der Kreislaufführung von Edelmetallen, Sondermetallen und Kunststoffen von elektronischen Geräten identifizieren zu können, werden zunächst Materialien aus identifiziert, bei denen ein hohes Recyclingpotential oder eine hohe Umweltbelastung erwartet wird. Um das Recyclingpotential zu bewerten, wurde das potentielle Abfallaufkommen der ausgewählten Werkstoffe im Recycling abgeschätzt und bestehenden sowie derzeit in der Forschung befindlichen Recyclingprozessen gegenübergestellt. Gibt es bereits etablierte Recyclingprozesse oder sind mittelfristig wirtschaftliche Recyclingprozesse zu erwarten, dienen diese als Grundlage zur Entwicklung von Handlungsempfehlungen für das Produktdesign.

#### 3.1.1 Fallstudien und Zielstoffe

Die Auswahl der zu untersuchenden Fallstudien fand in Abstimmung mit dem Umweltbundesamt statt (Tabelle 4). Vorwiegende Begründungen sind beispielsweise die Erwartung einer zeitnahen Revision der Anforderungen an die jeweilige Produktgruppe unter der Ökodesign-Richtlinie oder die Bedeutung der Produktgruppe beim Umweltzeichen „Blauer Engel“.

Tabelle 4: Im Forschungsvorhaben betrachtete Produktgruppen und jeweilige Begründungen für die Auswahl

Fallstudie	Begründung
Notebooks	Input für die Revision der Anforderungen unter der Ökodesign-RL und dem Blauen Engel
Smartphones	Input für die Revision der Anforderungen unter dem Blauen Engel
Flachbildschirm-TVs	Input für Anforderungen unter der Ökodesign-RL und dem Blauen Engel
Drucker	Anknüpfungspunkt freiwillige Selbstverpflichtung; verstärkter Fokus auf Kunststoffe sowie Input für die Revision der Anforderungen unter dem Blauen Engel

In Tabelle 5 sind die in diesem Forschungsvorhaben betrachteten Werkstoffe aufgeführt. Die Werkstoffe werden in die drei Gruppen Edelmetalle, Sondermetalle und Kunststoffe gegliedert. Unter Sondermetallen werden hier insbesondere Technologiemetalle verstanden, die spezielle Funktionen erfüllen und in der Regel in geringen Mengen in bestimmten elektronischen Produkten verwendet werden. Bei den Kunststoffen werden Polymerwerkstoffe aufgetragen, die in der Herstellung der betrachteten elektronischen Produkte als mengenrelevant eingestuft werden. Die Auswahl der Werkstoffe orientierte sich auch an den in den Forschungsvorhaben des Umweltbundesamtes „Abfallwirtschaftliche Produktverantwortung unter Ressourcenschutzaspekten (RePro)“ (Sander et al. 2012) und „Recyclingpotenzial strategischer Metalle (ReStra)“ (Sander et al. 2016) getroffenen Annahmen zu ressourcenrelevanten Metallen und wird um die Ebene der Kunststoffe erweitert.

Tabelle 5: Werkstoffe im Fokus des Forschungsvorhabens

Edelmetalle	Sondermetalle	Kunststoffe
Gold	Kobalt	ABS
Platin	Neodym	PS
Silber	Tantal	HIPS
Kupfer <sup>4</sup>	Gallium	PC
Palladium	Indium	PMMA

Die folgenden Sondermetalle und Kunststoffe wurden im Forschungsvorhaben nicht betrachtet um die Arbeiten zu fokussieren und weil die Datenlage teilweise nicht als ausreichend betrachtet wurde:

- ▶ Die Sondermetalle Antimon, Beryllium, und Yttrium
- ▶ Die Kunststoffe PP und PE

### 3.1.2 Altgeräteaufkommen

Um die Relevanz der untersuchten Produktgruppen hinsichtlich ihrer Bedeutung im Recyclingprozess bewerten zu können, wurden zunächst die Absatzzahlen der Zielprodukte weltweit, europaweit und deutschlandweit recherchiert. Für Deutschland wurde zusätzlich das potentielle Altgeräteaufkommen abgeschätzt.

Als Datengrundlage für die Marktdaten und das potentielle Altgeräteaufkommen der Zielprodukte in Deutschland dient die Studie „Entwicklung des IKT-bedingten Strombedarfs in Deutschland“ im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (Stobbe et al. 2015). In dieser Studie wird aus

<sup>4</sup> Kupfer wird in diesem Bericht gemeinsam mit den Edelmetallen aufgeführt, ist aber eigentlich ein Halbmetall

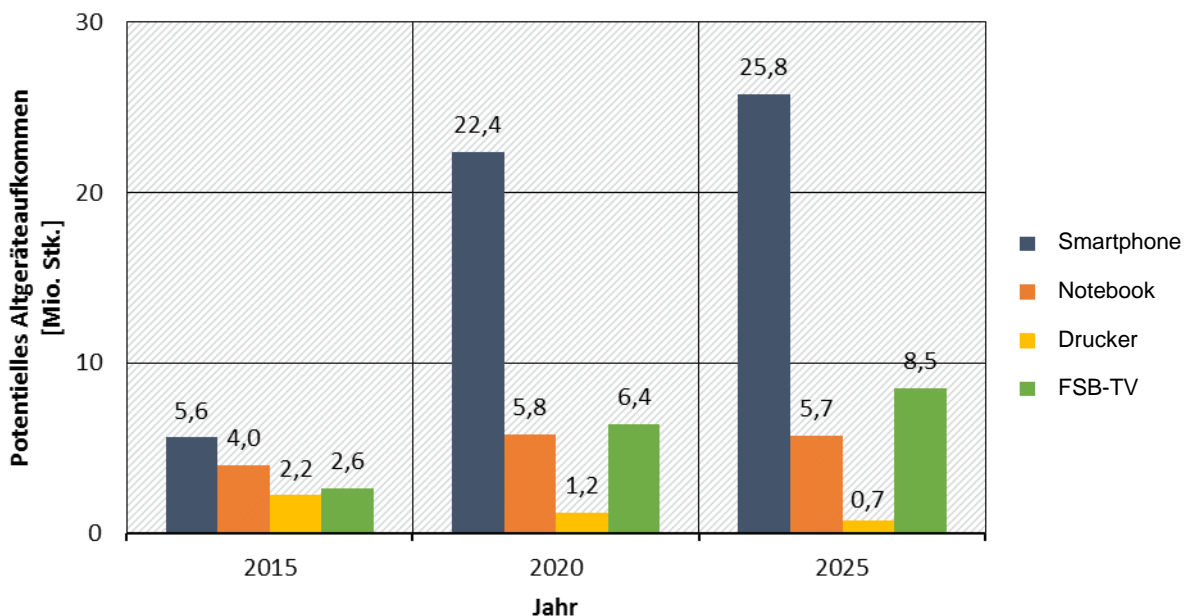
den Absatzstatistiken der untersuchten Produktgruppen für das Jahr 2015 der jeweilige Gerätebestand in Deutschland abgeschätzt und bis zum Jahr 2025 prognostiziert. Mittels dieses Datenmodells lässt sich, unter Berücksichtigung des Nutzungsszenarios der einzelnen Produktgruppen, der durch IKT bedingte Stromverbrauch in Deutschland abschätzen. Die Studie enthält weiterhin Daten für zur Nutzungsdauer der jeweiligen Produktgruppen und bezieht dabei Änderungen in der Nutzungsdauer, beispielsweise durch Technologiewechsel (bspw. die Ablösung von Plasmatechnologie durch LCD-Technologie bei Flachbildschirmfernsehern), mit ein. Darauf aufbauend wurde im vorliegenden Forschungsvorhaben die durchschnittlichen Verweildauern der Produkte in deutschen Haushalten abgeschätzt (Tabelle 6).

Tabelle 6: Angenommene Verweildauer der Zielprodukte in Jahren

	Notebook	Smartphone	FBS-TV	Drucker
Nutzungsdauer nach (Stobbe et al. 2015)	4 - 5,5	2,5 - 3,5	3 - 8	8
Angenommene Verweildauer [Jahre]	7,5	5 - 6	5 - 10	10

Abbildung 16 zeigt das potentielle Altgeräteaufkommen der vier Fallstudien, in Millionen Stück, in den Jahren 2015, 2020 und 2025. Als Grundlage dieser Hochrechnung dienen die prognostizierten Altgeräteaufkommen der Fallstudien unter Berücksichtigung der Marktdaten nach Stobbe et al. (2015) und der angenommenen Verweildauern in deutschen Haushalten. In dieser Hochrechnung werden weder Exporte von gebrauchten Elektroaltgeräten, noch informell entsorgte Elektroaltgeräte berücksichtigt (Hausmüll, illegale Verbringung etc.). Die tatsächlichen in den fachgerechten Recyclingpfad in Deutschland eingehenden Gerätezahlen sind entsprechend geringer einzuschätzen.

Abbildung 16: Potentielles Altgeräteaufkommen [Mio. Stk.] der Zielprodukte in den Jahren 2015, 2020 und 2025

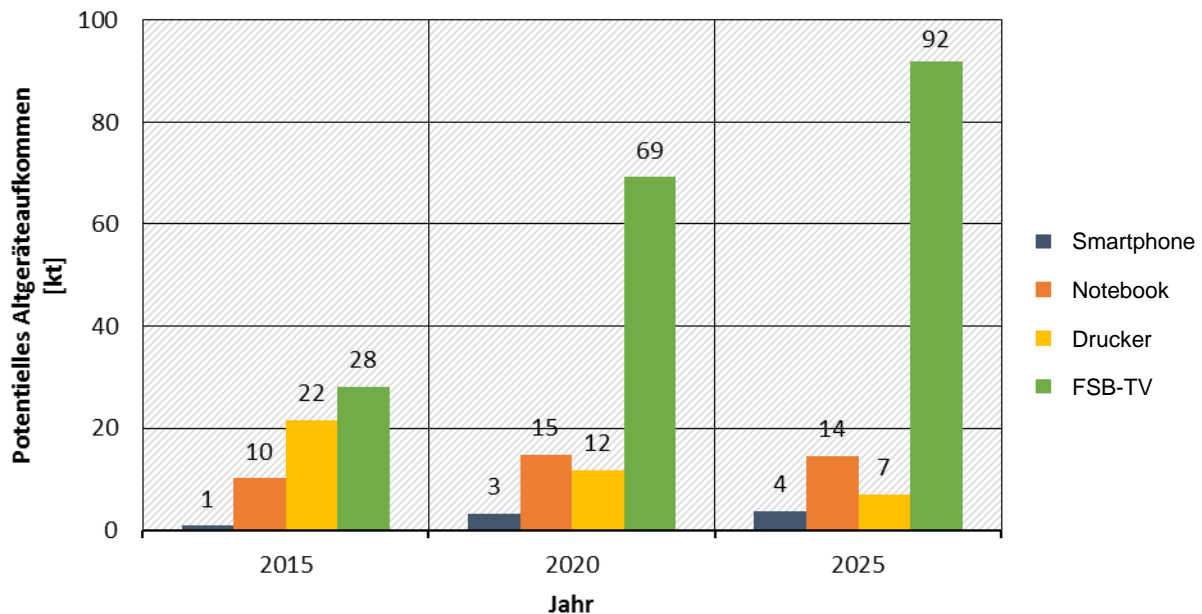


Quelle: Eigene Darstellung, Technische Universität Berlin

Abbildung 17 zeigt die potentiellen Altgeräteaufkommen der vier Fallstudien in Kilotonnen in den Jahren 2015, 2020 und 2025. Als Grundlage dieser Hochrechnung dienen die in Abbildung 16 dargestellten Altgeräteaufkommen der Fallstudien und die in eigenen Untersuchungen bestimmten Durch-

schnittsgewichte. Auch in dieser Hochrechnung werden weder Exporte von gebrauchten Elektroaltgeräten, noch informell entsorgte Elektroaltgeräte berücksichtigt. Die tatsächlichen in den fachgerechten Recyclingpfad in Deutschland eingehenden Massen sind ebenso entsprechend niedriger einzuschätzen.

Abbildung 17: Potentielles Altgeräteaufkommen [kt] der Zielprodukte in den Jahren 2015, 2020 und 2025



Quelle: Eigene Darstellung, Technische Universität Berlin

## 3.2 Ausgangslage

### 3.2.1 Gesetzliche Grundlagen

Bei der Betrachtung der ordnungsrechtlichen Instrumente, die als relevant für das Forschungsvorhaben eingestuft werden, richtet sich der Blick insbesondere auf die Ökodesignrichtlinie<sup>5</sup>, daneben auf das Elektro- und Elektronikgerätegesetz<sup>6</sup> (ElektroG), Batteriegesetz<sup>7</sup> (BattG) und auf das Kreislaufwirtschaftsgesetz<sup>8</sup> (KrWG). Zudem können neben diesen rechtlichen Instrumenten auch freiwillige Instrumente wie Ökolabel (Umweltzeichen) angewendet werden, um ökologische Kriterien im Produktbereich zur Umsetzung zu verhelfen. Nicht selten dienen Label des Typs 1, bspw. der Blaue Engel oder

<sup>5</sup> Richtlinie 2009/125/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 21. Oktober 2009 zur Schaffung eines Rahmens für die Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung von energieverbrauchsrelevanten Produkten (ABl. L 285 v. 31.10.2009, S. 10).

<sup>6</sup> Gesetz über das Inverkehrbringen, die Rücknahme und die umweltverträgliche Entsorgung von Elektro- und Elektronikgeräten, Elektro- und Elektronikgerätegesetz vom 20. Oktober 2015 (BGBl. I S. 1739), das zuletzt durch Artikel 16 des Gesetzes vom 27. Juni 2017 (BGBl. I S. 1966) geändert worden ist

<sup>7</sup> Gesetz über das Inverkehrbringen, die Rücknahme und die umweltverträgliche Entsorgung von Batterien und Akkumulatoren, Batteriegesetz vom 25. Juni 2009 (BGBl. I S. 1582), das zuletzt durch Artikel 6 Absatz 10 des Gesetzes vom 13. April 2017 (BGBl. I S. 872) geändert worden ist.

<sup>8</sup> Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen, Kreislaufwirtschaftsgesetz vom 24. Februar 2012 (BGBl. I S. 212), das zuletzt durch Artikel 2 Absatz 9 des Gesetzes vom 20. Juli 2017 (BGBl. I S. 2808) geändert worden ist.

das EU-Umweltzeichen, als Vorreiter und ordnungsrechtliche Instrumente folgen den ökologisch vorteilhaften Anforderungen der Label mit einigen Jahren Verzögerung.

Die Ökodesign-RL bildet den Rechtsrahmen für die Festlegung von Ökodesign-Anforderungen an ausgewählte energieverbrauchsrelevante Produktgruppen. Die Ökodesign-RL wird als das ordnungsrechtliche Instrument eingeschätzt, mit dem ökologisch relevante Aspekte im Produktbereich am durchsetzungsstärksten umgesetzt werden können. Zum einen gibt die Ökodesign-RL dazu die Möglichkeit, da sie sehr anwendungsorientiert formuliert ist, zum anderen hat sie im Gegensatz zu freiwilligen Instrumenten wie Label eine vollumfängliche Durchsetzung auf alle von der Richtlinie erfassten Produkte.

### 3.2.2 Umweltzeichen

Weltweit bestehen derzeit über 400 bekannte Produktkennzeichnungen und Labels, mit dem Ziel die Umweltverträglichkeit von Produkten zu bewerten und besonders nachhaltige und umweltverträgliche Produkte auszuzeichnen und zu fördern (Winzer 2016). In diesem Forschungsvorhaben werden die Produkthanforderungen von sechs anerkannten Umweltzeichen näher untersucht und hinsichtlich der in dieser Arbeit untersuchten Produkte ausgewertet. Der Betrachtungshorizont dieser Arbeit umfasst: den Blauen Engel, das European Ecolabel, das Nordic Ecolabel (Nordischer Schwan), das TCO Label, das EPEAT Label und das Eco Mark Label. Im Folgenden werden die genannten Umweltzeichen kurz allgemein eingeführt und in den einzelnen Fallstudien hinsichtlich ihrer produktspezifischen Anforderungen näher beleuchtet.

#### Der Blaue Engel



Der Blaue Engel ist eine 1978 vom Staat initiierte und von einer unabhängigen Jury vergebene Kennzeichnung für Produkte, die im Vergleich zu anderen Produkten gleichen Nutzens umweltverträglicher sind. Das Umweltzeichen soll den Verbraucherinnen und Verbrauchern die Kaufentscheidung erleichtern und den Wettbewerb hinsichtlich ökologischer Produkte fördern. Mittlerweile tragen rund 12000 Produkte in über 120 Produktgruppen den Blauen Engel. Zertifizierte Produkte

müssen die produktspezifischen Anforderungen – festgelegt in Vergabekriterien - erfüllen. Dabei wird der gesamte Lebenszyklus eines Produktes betrachtet und hinsichtlich seiner Umweltverträglichkeit und Gebrauchssicherheit bewertet. Um dabei die technische Entwicklung widerzuspiegeln, werden alle drei bis vier Jahre die Kriterien überprüft. Die Entscheidung über die Vergabekriterien des Blauen Engels obliegen der Jury Umweltzeichen, die sich unter anderem aus Vertreterinnen und Vertretern von Umwelt- und Verbraucherverbänden, Gewerkschaften, Industrie, Handel und Handwerk zusammensetzt. Zeicheninhaber ist das Bundesumweltministerium, die Vergabekriterien werden durch das Umweltbundesamt erarbeitet. Die RAL gGmbH ist die Zeichenvergabestelle.

#### European Ecolabel (EU-Umweltzeichen)



Das europäische Umweltzeichen wurde 1992 ins Leben gerufen und soll den Verbraucherinnen und Verbrauchern in Europa das Erkennen umweltfreundlicher Produkte und Dienstleistungen erleichtern. Derzeit kann das europäische Umweltzeichen in 29 Produkt- und Dienstleistungsgruppen vergeben werden. Die Vergabekriterien sind das Ergebnis wissenschaftlicher Studien und intensiver Beratungen des „European Union Ecolabelling Board“ (EUEB). Dieses Gremium setzt sich zusammen aus den Vergabestellen der Mitgliedstaaten, Vertretern von Umweltschutzorganisationen, Verbraucher- und Industrieverbänden, Gewerkschaften, der Vertretung kleiner und mittelständischer Unternehmen, sowie Beobachtern aus nicht EU-Staaten. Die Vergabe des Siegels erfolgt durch die zuständige nationale Behörde oder Institution der Mitgliedsstaaten. In Deutschland wurde diese Aufgabe der RAL gGmbH übertragen. Das Umweltbundesamt (UBA) vertritt Deutschland im EUEB und ist somit in die Kriterienentwicklung eingebunden. Die Vergabe des Labels ist zeitlich begrenzt.

## TCO (Tjänstemännens Centralorganisation)



Das TCO-Siegel wird vom schwedischen Dachverband der Angestellten und Beamtengewerkschaft vergeben. Bewertet werden die ergonomische Qualität, die Energieeffizienz und die Emissionen eines Produktes. Ziel des Labels ist es, eine Hilfestellung bei der Wahl von Büroausstattungen zu geben, die die Arbeitsplatzqualität verbessern. Die Anforderungen an die Produkteigenschaften sind zeitabhängig und werden in regelmäßigen Abständen überarbeitet und aktualisiert. Die im Siegel integrierte Jahreszahl signalisiert den Stand der Anforderungen. In der Regel gilt: je jünger das Siegel, desto höher die Anforderungen an die Produkteigenschaften. Produkte, die nicht die aktuellsten Kriterien erfüllen, können auch mit dem Label einer vergangenen Revisionsrunde ausgezeichnet werden.

## Nordic Ecolabel



Das Nordic Ecolabel wurde im Jahr 1989 vom „Council of Ministers“ des „Nordic Council“ initialisiert, mit dem Ziel nachhaltige und klimafreundliche Produktionsprozesse und nachhaltigen Konsum zu fördern. In der Beurteilung der Produkte wird der gesamte Lebenszyklus eines Produktes beleuchtet und bei der Festlegung der Vergabekriterien berücksichtigt. Das „Nordic Council“ ist ein interparlamentarisches Forum zur Kooperation der Staaten Dänemark, Finnland, Island, Norwegen, Schweden, Aland, Färöer-Inseln und Grönland. Derzeit (Stand November 2017) kann das Nordic Ecolabel in 63 Produktgruppen vergeben werden.

## EPEAT (Electronic Product Environmental Assessment Tool)



EPEAT ist eine in Nordamerika seit 2006 eingesetzte Kennzeichnung für elektronische Produkte, die stetig an weltweiter Bedeutung gewinnt. Betrachtet wird der gesamte Lebenszyklus von der Produktentwicklung bis zum End-of-Life eines Produktes und hinsichtlich des Energiebedarfs und der Recyclingfähigkeit bewertet. Sie wurde von der Non-Profit Organisation Green Electronic Council (GEC) initialisiert und in Kooperation mit internationalen Partner einheitlich nach dem internationalen, öffentlichen Standard IEEE 1680 vergeben. In Deutschland kooperiert beispielsweise der Verband der Elektrotechnik, Elektronik Informationstechnik e.V. (VDE) mit der GEC zur Vergabe der Kennzeichnung. Größere Bedeutung erlangte die EPEAT Kennzeichnung im Jahre 2007 durch einen Erlass der US-Regierung, nach dem 95 Prozent der Produkte, die von Bundesbehörden gekauft werden, das EPEAT-Label tragen müsse, sofern die Produktgruppen bereits erfasst wurden.

## Eco Mark Label - Japan



Das Eco Mark Label ist ein im Jahre 1989 ins Leben gerufenes Programm, um Konsumenten eine Hilfestellung bei der Auswahl von ökologisch sinnvollen und nachhaltigen Produkten zu geben. Es wird von der japanischen Umweltbehörde (Japan Environmental Agency – JEA) organisiert und vergeben und wurde nach dem Vorbild des deutschen Produktlabels „der Blaue Engel“ entwickelt. Derzeit (Stand: 14.12.2017) können Produkte in 65 Kategorien mit dem Eco Mark Label zertifiziert werden.

### 3.2.3 Behandlung von EAG

In der Bundesrepublik Deutschland ist die Entsorgung und Verwertung von EAG über eine geteilte Produktverantwortung zwischen öffentlich-rechtlichen Entsorgungsträgern und den Herstellern und Inverkehrbringern der Elektronikprodukte organisiert. Die öffentlich-rechtlichen Entsorgungsträger richten im Rahmen ihrer Pflichten nach § 20 des Kreislaufwirtschaftsgesetzes Sammelstellen ein, an denen Altgeräte aus privaten Haushalten ihres Gebietes angeliefert werden können (Bringsystem). Die

Rücknahme von Elektroschrott wird durch das ElektroG (§§ 15, 16, 17) den Herstellern und Inverkehrbringern von Elektronikprodukten zugeschrieben. Diese haben für die ordnungsgemäße Sammlung und Entsorgung von Elektroaltgeräten zu sorgen und aufzukommen.

Mit dem Ziel eines möglichst geschlossenen und effizienten Stoffkreislaufes definiert das Kreislaufwirtschaftsgesetz im § 6 Absatz 1 eine klare Rangfolge an Maßnahmen im Umgang mit Abfällen:

- ▶ Vermeidung
- ▶ Vorbereitung zur Wiederverwendung
- ▶ Recycling
- ▶ Sonstige Verwertung, insbesondere energetische Verwertung und Verfüllung
- ▶ Beseitigung

In der Erstbehandlung sind die eintreffenden Elektronikaltgeräte nach den in § 20 ElektroG definierten Anforderungen zu behandeln. Dazu gehört unter anderem das Prüfen, ob Altgeräte oder einzelne Bauteile einer Vorbereitung zur Wiederverwendung zugeführt werden können. Dies geschieht in der Regel in einer ersten, manuellen Vorsortierung durch den erstbehandelnden Betrieb. In einem weiteren Schritt sind sichtbare und bekannte Schadstoffe und schadstoffhaltige Bauteile aus den Altgeräten zu entfernen, getrennt zu erfassen und einer ordnungsgemäßen Entsorgung zuzuführen (§ 20 Absatz 2 ElektroG). Die hiervon betroffenen Stoffe, Gemische und Bauteile sind in Anlage 4 ElektroG aufgeführt. Auch dieser Handlungsschritt wird in der Praxis überwiegend manuell durchgeführt (Chancerel et al. 2009). Als nächster Schritt erfolgt in der Regel eine erste maschinelle Grobzerkleinerung der Elektroaltgeräte, gefolgt von einer weiteren, manuellen Sortierung zur Entfernung der restlichen Schadstoffe und einer ersten Aussortierung von recyclingrelevanten Baugruppen, wie beispielsweise Leiterplatten. Im letzten Behandlungsschritt vor der weiteren Verarbeitung werden die Elektro(nik)altgeräte abermals automatisch zerkleinert und automatisiert sortiert. Die entstandenen Outputfraktionen werden dann den Prozessen des Metall- und Kunststoffrecyclings zugeführt, anderweitig stofflich bzw. energetisch verwertet oder deponiert (Chancerel 2010a). Zum Beispiel wurden 2014 insgesamt 722.968 Tonnen Elektroaltgeräte gesammelt, wovon 689.910 Tonnen und damit 95,4 Prozent verwertet wurden. Abzüglich der energetischen Verwertung wurden 608.587 Tonnen und damit 84,2 Prozent der gesammelten Menge recycelt.<sup>9</sup> Dazu wird angemerkt, dass diese Daten lediglich das Gewicht der Altgeräte, die einer Verwertungs- oder Recyclinganlage zugeführt werden, in Relation zum Gewicht aller gesammelten Altgeräte abbildet. Die Menge an stofflich zurückgewonnenen Sekundärrohstoffen ist entsprechend geringer einzuschätzen.

Die Teilnehmer des Begleitkreises zum vorliegenden Forschungsvorhaben berichteten über den Trend zum generellen Rückgang manueller Demontageschritte in der Erstbehandlung. Als wesentlicher Grund wurden Personalkosten und sinkende Marktpreise für relevante stoffliche Outputfraktionen der Anlagen genannt. Gleichzeitig ist ein Trend hin zu mehr Automatisierung denkbar. Auch hier muss Ökodesign im möglichen Rahmen Vorarbeiten leisten, damit Geräte, die erst in einigen Jahren im Recycling auflaufen, die technischen Möglichkeiten der Recyclinganlagen im Produktdesign reflektieren.

Das im Jahr 2015 novellierte ElektroG enthält in § 24 (2) eine Ermächtigungsgrundlage für die Bundesregierung, durch Rechtsverordnung weitergehende Anforderungen an die Behandlung von EAG, einschließlich der Verwertung und des Recyclings, über eine sogenannte Behandlungsverordnung festzulegen. Dazu entwickelte das Umweltbundesamt gemeinsam mit einem Arbeitskreis und unter Einbindung relevanter Akteure aus Wirtschaft, Wissenschaft, Verbänden und Behörden in mehreren

---

<sup>9</sup> <https://www.umweltbundesamt.de/daten/ressourcen-abfall/verwertung-entsorgung-ausgewaehlter-abfallarten/elektro-elektronikaltgeraete>, Abruf am 30.04.2018.

Arbeitsgruppen weitergehende Empfehlungen für mögliche Behandlungsanforderungen an EAG (Umweltbundesamt 2017b). Dort wird für einige Geräte eine verpflichtende Separierung bestimmter Baugruppen vor der mechanischen Grobzerkleinerung gefordert. Über diesen Weg wäre eine Zunahme manueller Demontageschritte denkbar, solange sie einen positiven Nutzen im Sinne der Ressourcenschonung und Schadstoffentfrachtung mit sich bringen.

### 3.2.4 Recycling von Edel- und Sondermetallen aus EAG

Der Einsatz der Vielzahl an Edel- und Sondermetallen in Elektro(nik)produkten hat in den vergangenen Jahren zugenommen. Insbesondere der in den Medien thematisierte „Seltene-Erden-Schock“ hat innerhalb der deutschen Industrie starke strategische Ausrichtungsveränderungen nach sich gezogen. Vorwiegend ging es dabei darum, die geopolitische Abhängigkeit von Deutschland im Bereich von Edel- und Sondermetallen zu reduzieren. Um den Standort Deutschland und darüber hinaus die europäische Wettbewerbsfähigkeit auch für die Zukunft sicher zu stellen, wurden nach der Ankündigung Chinas im Jahre 2011, die Mengen an Edel- und Sondermetallen für den Export erheblich zu reduzieren, Gegenmaßnahmen ergriffen. Dazu gehörte unter anderem ein intensiver Forschungsprozess, um Edel- und Sondermetalle durch hydro- und pyrometallurgische Recyclingprozesse zurückzugewinnen zu können.

Im Rahmen des vorliegenden Forschungsvorhabens wurden etliche Duzend abgeschlossene Forschungsprojekte einem Screening unterzogen, um erfolgsversprechende Ansätze des Recyclings aufzuzeigen (Kapitel 3.3). Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Projektergebnisse ein eher ernüchterndes Bild aufzeigen. Insbesondere Sondermetalle sind in der hydro- und pyrometallurgischen Prozessführung extrem schwer und nur mit erheblichem Kostenaufwand zurück zu gewinnen. Viele Projekte sind daher ergebnisoffen zum Ende gekommen, was den Forschungsbereich der Recyclingprozessentwicklung angeht. Eine große Problemstellung stellt beispielsweise die Aufkonzentration und Vereinzeln der Edel- und Sondermetalle in der gesamten Recyclingkette dar. Insbesondere in Hochofenprozessen befinden sich teils über 60 Elemente des Periodensystems, die durch spezielle Prozessführung in Gruppen oder einzeln aus der Schmelze auszufallen wären.

Im Projektscreening wird spezieller auf vier ausgewählte Projekte eingegangen, um die unbefriedigenden Screening-Ergebnisse besser nachvollziehen zu können. Das in Zukunft eine holistische Kreislaufführung von Edel- und Sondermetallen erzielt werden kann, wird vom Forschungsnehmer zwar nicht ausgeschlossen, der Weg zu geschlossenen Kreisläufen der in Elektro(nik)produkten eingesetzten Edel- und Sondermetalle wird jedoch als äußerst schwierig eingeschätzt.

Die wirtschaftliche Bedeutung der Rückgewinnung von Edel- und Sondermetallen erschließt sich insbesondere aus den hohen Kupfer- und Edelmetallanteilen in den verbauten bestückten Leiterplatten. Entsprechend stellt das Recycling von Kupfer den derzeit treibenden ökonomischen Faktor im Recyclingprozess für EAG dar. Während der Wiedergewinnung des Kupfers können auch andere Metalle zurückgewonnen werden, wenn sie in ausreichender Konzentration vorliegen. Im Begleitkreis dieses Forschungsvorhabens konnte auf die Erfahrungen eines großen Produzenten von Kupfer und Edelmetallen aus Sekundärrohstoffen zurückgegriffen werden. Laut Aussagen dieses Begleitkreismitgliedes stammen rund 35-40 Prozent der Kupfer- und Goldproduktion und 60-70 Prozent der Silberproduktion in den konzerneigenen Prozessen aus Sekundärrohstoffen. Laut eigenen Aussagen haben Elektro- und Elektronikschrotte einen Anteil von 15-20 Prozent an den eingesetzten Sekundärrohstoffen. Derzeit lassen sich mit den angewendeten Prozessen in der Kupfergewinnung rund 20 Metallwerkstoffe zurückgewinnen, darunter auch Metalle, die in diesem Projekt in die Betrachtung gekommen sind, wie die Edelmetalle Gold, Platin, Palladium und Silber.

Die in diesem Forschungsvorhaben untersuchten Sondermetalle werden derzeit in der Kupferproduktion nicht oder fast nicht zurückgewonnen. Es existieren wenige geeignete Recyclingpfade für einzelne Sondermetalle, bspw. kann im Batterierecycling u.a. Kobalt stofflich zurückgewonnen werden.

Für Edel- und Halbedelmetalle bestehen Rückgewinnungsprozesse, deren Prinzipien vor teils hundert Jahren entwickelt worden sind und für welche die technischen Realisierungen noch heute verbessert werden. Für Sondermetalle, die teilweise zu den wirtschaftsstrategischen Rohstoffen gehören, bestehen wenige Rückgewinnungsprozesse, die teils noch in der Erforschung sind.

### 3.2.5 Recycling von Kunststoffen aus EAG

Kunststoffe haben mit rund 21 Prozent hinter den metallischen Werkstoffen den zweitgrößten Anteil an der Materialverteilung in elektronischen Geräten (Widmer et al. 2005). Ein wirtschaftliches Recycling von Kunststoffen ist derzeit in der Abfallverwertung von elektronischen Altgeräten vielfach nicht möglich. Die technischen Herausforderungen beim Kunststoffrecycling, bedingt durch die hohe Materialvielfalt von Polymeren, den diversen Zusatzstoffen in Kunststoffkomponenten und die derzeit fehlende Akzeptanz von Rezyklatkunststoffen in der Produktion, verhindern, dass Kunststoffe, die in elektronischen Altgeräten eingesetzt werden, mit ähnlich hohen Recyclingquoten zurückgewonnen werden wie Metallwerkstoffe.

Für den Begleitkreis dieses Forschungsvorhaben konnten zwei Teilnehmer gewonnen werden, die Kunststoffe aus EAG in industriellem Maßstab recyceln. Im Folgenden werden kurz das generelle Vorgehen beim Kunststoffrecycling und die von den Teilnehmern des Begleitkreises adressierten Problemstellungen beleuchtet.

Thermoplastische, also nicht vernetzte Kunststoffe, bieten als Polymerwerkstoff, im Vergleich zu vernetzten Polymerwerkstoffen, die chemisch und physikalisch günstigsten Eigenschaften um stofflich recycelt zu werden. Hierfür wird im Bereich der EAG Entsorgung die sogenannte Schredderleichtfraktion, also der im Recycling aussortierte Kunststoffanteil, an spezialisierte Kunststoffrecyclingbetriebe veräußert, um dort nach den einzelnen enthaltenen Polymerwerkstoffen sortiert zu werden. Primär wird eine Trennung der recyclingrelevanten Kunststoffe über die unterschiedlichen Dichten der verwendeten Kunststoffarten erreicht. Die im Begleitkreis befragten Unternehmen führten diese Dichtentrennung mit Hilfe eines Schwimm-Sink-Verfahrens durch. Bei PC und ABS konnten, in Kombination mit weiteren Trennverfahren, Materialreinheiten zwischen 97 und 99,5 Prozent erreicht werden. Kunststoffe des gleichen Materials mit Zusatzstoffen, wie Flammhemmer, Glasfasern, Talk, Kohlenfasern oder Weichmacher, werden im Schwimm-Sink-Verfahren auf Grund einer im Vergleich zum Basispolymer erhöhten Dichte in der Regel aussortiert. Sie stehen dem Materialkreislauf somit nicht mehr zur Verfügung und werden, sofern möglich, energetisch verwertet.

Laut den praxisnahen Teilnehmern des Begleitkreises wird die Kunststofftypenkennzeichnung in der Regel nicht zur Sortierung von Kunststoffgehäuseelementen herangezogen. In einer Erstbehandlungsanlage wurden zum Zeitpunkt der Besichtigung manuell demontierte Gehäuseelemente nach Farben sortiert (dunkel, hell, bunt), nicht jedoch nach Kunststofftyp. Andere Betriebe führen keine manuelle Sortierung vor einer mechanischen Grobzerkleinerung durch. Nach der Zerkleinerung ist die Markierung nicht mehr zur Sortierung geeignet und es werden automatisierte Prozesse zur Sortierung verwendet (vgl. Kapitel 9.1).

Bei der Besichtigung einer Erstbehandlungsanlage wurde exemplarisch deutlich, welche Problemstellungen im Kunststoffrecycling auftreten können. In der Behandlungsanlage standen einige tausend Set-Top-Boxen des gleichen Typs zur Verfügung, die bereits manuell teildemontiert wurden, um die Festplatte eine Wiederverwendung zuzuführen. Die Kunststoffgehäuse bestanden aus nur einem Kunststofftyp. Die Erstbehandlungsanlage konnte zum Zeitpunkt der Besichtigung jedoch keinen Abnehmer zum stofflichen Recycling finden. Der Grund dafür waren auf der Unterseite angebrachte Gummipoppen sowie zwei aufgebracht Etiketten. Diese würden die Qualität des Kunststoffrezyklats am Ende negativ beeinflussen. Ein manuelles Entfernen der Gummipoppen und Aufkleber konnte aus ökonomischen Gründen nicht in Erwägung gezogen werden.

In der Forschung befinden sich verschiedene Ansätze zur Verbesserung des Recyclings von Kunststoffen aus EAG. Zum einen wird berichtet, dass der von Fraunhofer IVV entwickelte CreaSolv® Prozess Zusatzstoffe wie Brom und Antimon (als Flammschutzmittel bzw. Flammschutzmittelsynergist) von flammgehemmten Kunststoffen separieren und stofflich zurückgewinnen kann. Zum anderen werden große EU Projekte gefördert, die sich unter anderem mit der Standardisierung von Rezyklatqualität und der Förderung des Marktes und der Akzeptanz von Kunststoffrezyklaten als Substitution von neuen Kunststoffen befassen.

### **3.3 Screening von Projekten, die Edel- und Sondermetallrecycling im Fokus hatten**

Das Screening bzw. die Betrachtung und Evaluierung von Projekten diene dazu, die im Projektverlauf diskutierten Handlungsempfehlungen schon frühzeitig auf ihre Praxisrelevanz zu prüfen. So ist es kurz- bis mittelfristig gesehen kaum zielführend produktgruppenbezogene Designempfehlungen vorzuschlagen, die bspw. eine Kreislaufführung von einzelnen oder mehreren Edel- und Sondermetallen zum Ziel haben, wenn keine technische Möglichkeit besteht, dies auch im Recyclingprozess umzusetzen. Im Gegenteil, der Aufwand in Design- und Herstellungsphase würde steigen, Vorteile/Erlöse aus dem Recyclingprozess würden nicht eintreten. Die Gesamtumweltbilanz wäre letztlich negativ. Nicht außer Acht gelassen werden darf dabei natürlich, dass die Betrachtung vom Hier und Jetzt ausgeht und Innovationen im Recyclingprozess nicht oder zumindest sehr schwer antizipiert werden können. Es ging bei der Evaluation der Projekte daher zum einen darum zu prüfen, ob es bspw. technisch möglich wäre Edel- und Sondermetalle zurück zu gewinnen, auch wenn es ökonomisch uninteressant erscheint, oder aber aus eher physikalischen oder chemischen Gründen die Umsetzung ausgeschlossen wird. Beispielsweise weil die in kleinen Mengen vorkommenden Sondermetalle kein Ausfällkriterium aufweisen und in den großen Metallströmen (Kupfer, Eisen, Aluminium, etc.) untergehen, oder bspw. eine divers große Anzahl von unterschiedlichen Kunststoffen so miteinander verbunden (Compoundierung) sind, dass ein Aufschluss in die Einzelkunststoffe nicht mehr technisch möglich ist.

In das Projekt-Screening aufgenommen wurden insg. 65 Projekte, die öffentlich in Deutschland und von der EU gefördert wurden. Bei den Unternehmen liefen in der Vergangenheit und laufen gewiss noch heute interne Forschungsvorhaben, die zum Ziel haben bspw. Edel- und Sondermetalle besser zurück zu gewinnen, Informationen darüber sind jedoch öffentlich nicht verfügbar. Generell war die Informationsgewinnung teils sehr schwierig, was für öffentlich geförderte Projekte fragwürdig ist. Von etwa einem Drittel der Projekte konnten keine Informationen recherchiert oder telefonisch erfragt werden, von etwa einem Drittel nur wenige Informationen, von etwa einem Drittel war die Informationslage sehr ausführlich. In der Recherche hinsichtlich der Projektergebnisse war teils sehr schnell zu erkennen, dass die Relevanz bezogen auf die für das Forschungsvorhaben ausgewählten Produktgruppen (Flachbildschirmfernseher, Notebooks, Smartphones und Drucker) gering war. Viele Projekte adressierten per se Edel- und Sondermetalle nicht in elektronischen Produkten, sondern in teils sehr speziellen Anwendungsfeldern (z.B. Rotschlammdeponieabfälle, Müllverbrennungsaschen, Bergbauhalden, Dünnschicht-PV-Module, etc.). Von den öffentlich geförderten Projekten waren vier Projekte besonders relevant, so dass auf diese Projekte folgend näher eingegangen wird. Eine ausführliche Zusammenfassung der folgenden Projekte erfolgt aufgrund des Fokus des Forschungsvorhabens nicht. In Bezugnahme auf das Forschungsvorhaben dienen die vier ausgewählten Projekte lediglich dazu ausgewählte Problemfelder konkret und projektbezogen zu erläutern. Nach einer kurzen Einführung in die Projekte selbst, wird anhand der Projektergebnisse auf spezifische Erkenntnisgewinne für das Umweltbundesamt Forschungsvorhaben eingegangen.

### 3.3.1 InAccess (BMBF, r3)

**Projekthalt:** InAccess war ein Verbundforschungsvorhaben mit drei Partnern. Im Forschungsprojekt InAccess sollten drei verschiedene Teilbereiche der Verwertungskette für Displaygeräte untersucht werden: Sammlung, Zerlegung/Schadstoffentfrachtung und Behandlung der Glasfraktion zur Rückgewinnung von Indium. Im Projekt wurde zunächst ein Sammelsystem für diese Geräteart entwickelt, welches sich in den bestehenden Logistiksystemen problemlos einsetzen lässt. Dieses Sammelsystem (spezielle Gitterboxen) erfasste die LCD-Bildschirmgeräte bruchfrei und bot gleichzeitig die Möglichkeit der eindeutigen Vorsortierung von LCD-TV- und LCD-Monitor-Geräten. Die Electroycling GmbH sammelt nach diesem System noch heute LCD-Bildschirmgeräte. Eine herkömmliche Sammlung in Containern der Sammelgruppe 3 gemeinsam mit deutlich schwereren CRT-Monitoren und diversen TV-Geräten führt üblicherweise zu einer Zerstörung eines Großteils der LCD-Bildschirmgeräte. Dies ist problematisch, da sich zerstörte oder teilzerstörte LCD-Bildschirmgeräte nicht in den im Projekt entwickelten, nachfolgenden Recyclingprozessen einsetzen lassen – u.a. können Kontaminationen mit Quecksilber unkontrolliert entstehen und zur Gefahr für die Gesundheit von Mitarbeitern\*innen werden, zum andern benötigt die Zerlegemaschine unzerstörte Geräte, um sich im Prozess einrichten zu können.

Sowohl für die LCD-TV-Geräte als auch für die LCD-Monitorgeräte konnte ein teilautomatisierter Prozess zur Schadstoffentfrachtung und Zerlegung der Geräte entwickelt werden. In diesen Verfahren wird die quecksilberhaltige Hintergrundbeleuchtung entnommen und das enthaltene Quecksilber sicher erfasst. Gleichzeitig wird in diesem Prozess das indiumhaltige Display freigelegt und steht damit getrennt vom Restgerät für eine weitere Aufbereitung zur Verfügung. Die schadstoffentfrachteten Restgeräte wurden durch herkömmliche schlagende und brechende mechanische Verfahren weiter zerlegt und die enthaltenen Sekundärrohstoffe wurden nachgelagerten Recyclingbetrieben bzw. Verwertern zugeführt. Die Verfasser heben besonders die deutliche Steigerung der Produktivität durch dieses Verfahren hervor. Benötigte man bei einer manuellen Zerlegung je nach Aufbau der LCD-Bildschirmgeräte 10 – 20 min pro Gerät, so wird mit den entwickelten Zerlegelinien (insbesondere ein Sägetisch zum Öffnen der Displayfläche) nun eine Zerlegezeit von ca. 2 min pro Gerät erreicht. Beide Zerlegelinien wurden aus der Entwicklungsphase in den industriellen Maßstab überführt und werden seither eingesetzt. Zielwertstoff im Projekt war das Indium. Im Projektverlauf ist ein Verfahren entwickelt worden, mit welchem es gelungen ist, das im Displayglas enthaltene Indium herauszulaugen und die Lösung für bestehende Prozesse der Indiumgewinnung so weit anzureichern, dass das in den Geräten enthaltene Indium nahezu vollständig recycelt werden kann.

**Erkenntnisgewinn für das Forschungsvorhaben:** An sich positiv hervorzuheben ist die erfolgreiche Entwicklung des Laugenprozesses. Das Verfahren an sich erwies sich jedoch schon in Berechnungen im Projektverlauf als unwirtschaftlich – sowohl beim derzeitigen Indium-Preis als auch bei deutlich steigendem Preis. Die Verfasser der Studie verweisen dahingehend insbesondere auf die aufwendige und verschleißintensive mechanische Aufbereitung des Displayglases. Für die Laugung müssen Reagenzien vorgehalten werden und sind säurebeständige Apparate anzuschaffen. Der Laugungsprozess ist langwierig und bringt weitere Kosten mit sich. Der zu erzielende Preis für das Indiumkonzentrat kann die Kosten für diesen Prozessschritt bei weitem nicht decken. Die Projektpartner heben jedoch hervor, dass der an sich entwickelte Prozess für ähnliche indiumhaltige Abfallströme übertragbar wäre (indiumhaltige Glasfraktionen aus dem Recycling von Solarmodulen).

Auch positiv hervorzuheben ist die Entwicklung der Zerlegelinien. Die beiden Zerlegelinien für Bildschirmgeräte stellen hinsichtlich herausragender Innovationsforschung sicherlich nicht den großen Schritt in die Zukunft dar, sie zeigen eher auf wie rudimentär die Branche oft noch in der Zerlegung arbeitet und welchen Investitionsbedarf es in der Branche gibt. Da aber viele Erstbehandler in den vergangenen Jahren eher ums wirtschaftliche Überleben kämpften als große Investitionen zu tätigen, ist auch heute das zur Verfügung stehende Equipment im End-of-Life eher grobschlächtig. Insbesondere die für das Aufbrechen der Geräte eingesetzten Verfahren sind stark schlagend und zertrümmernd. Dieses Vorgehen erklärt sich dadurch, dass die End-of-Life Branche getrieben ist durch Erlöse aus Metallen. Ein schnelles und schonungsloses Herankommen an die werthaltigen Metalle (wie insb. Aluminium, Kupfer, Gold) ist das primäre Ziel, nicht die sortenreine Separierung aller Elemente des Perio-

densystems, die zwar in großer Anzahl aber kleinen Einzelmengen in den Geräten vorkommen. Insbesondere Elemente bzw. Fraktionen, die in kleinen Mengen in den Geräten vorkommen und geringe Erlöse versprechen wie Seltene Erden, Indium, Gallium, etc. haben keine hohe Priorität in der End-of-Life Branche. Für das InAccess Zielmetall Indium sieht die Erfolgsbilanz des Projektes letztlich auch sehr ernüchternd aus. InAccess stellt damit keine Ausnahme dar, viele weitere Projekte im Bereiche Edelmetalle und Sondermetalle haben vergleichbare Ergebnisse erzielt. Die Gründe für den Misserfolg hinsichtlich Zielmetallrückgewinnung werden durch die folgenden zwei Projekte weiter identifiziert.

### 3.3.2 UPgrade (BMBF, r3)

**Projekthinhalte:** UPgrade war ein Verbundforschungsvorhaben mit rund 19 Partnern. Ziel des Projektes war es, bei der Behandlung von EAG und deren Komponenten über alle Stufen der Recyclingkette, die Anreicherung von ausgewählten Metallen durch neue und optimierte Prozesse und Prozessketten zu erreichen, um deren Rückgewinnung innerhalb existierender Recyclingsysteme zu verbessern, Verluste zu minimieren und Kreisläufe zu schließen. Demzufolge sollten strategische Abhängigkeiten von Rohstoffimporten durch verbessertes Recycling reduziert und eine Umweltbelastung bei der Primärproduktion vermieden werden. Aus den technischen Ergebnissen sowie dem intensiven Austausch mit projektexternen Akteuren wurden designspezifische, technikspezifische, stoffstromspezifische und ökonomische Barrieren abgeleitet. Da alle Barrieren spezifisch für einzelne technische Anwendungen von Zielmetallen sind, wurden die Barrieren pro Zielmetallanwendung (Antimon, Gallium, Germanium, Indium, Kobalt, Tantal, Zinn, Seltenerdelemente) mittels einer im Projekt entwickelten Matrix bewertet. Darauf aufbauend erfolgte ein Test neuer Anreicherungsverfahren, die auf bislang nur unzureichend rückgewonnene Metalle zielen. Darüber hinaus wurden „Design for Recycling“ Empfehlungen spezifisch für Spurenmetalle ausgesprochen.

**Erkenntnisgewinn für das Forschungsvorhaben:** Die Evaluierungs-Matrix für die Zielmetalle zeigte, dass alle Anwendungen der Ziel- und Leitmetalle Barrieren für eine Steigerung des Recyclings haben, welche überwunden werden müssen. Die Barrieren an sich sind teils sehr unterschiedlich. Für Kupfer, Edelmetalle und Zinn sind dies eher technische Hindernisse, welche sich mit neuen End-of-Life Aufschlusstechniken bzw. einem neuen Design für einen guten Aufschluss beheben lassen. Zu den Aufschlusstechniken und zum Design verweisen die Verfasser insbesondere darauf, dass die aktuellen gesetzlichen Rahmenbedingungen wenig Anreize für qualitativ hochwertiges Recycling setzen. Eine bessere Kontrolle und ein Monitoring der Stoffströme sehen die Verfasser als einen Lösungsansatz. Antimon, Indium, Tantal und Neodym sind Metalle, die nicht im Rahmen der Leiterplatten-Behandlung zurückgewonnen werden. Hier ist zuvor eine Separierung wertmetallhaltiger Bauteile und Komponenten erforderlich, da die Rückgewinnung dieser Metalle zwar technisch möglich ist, aber in der Praxis nicht umgesetzt wird. Ob diese zusätzlichen Separierungsschritte tatsächlich in der Praxis umgesetzt werden, hängt auch vom Aufbau einer entsprechenden Endverwertungsinfrastruktur ab, welche eine gewisse kritische Masse an Material erfordert. Hier könnte künftig eine Bündelung von Stoffströmen unterstützend wirken. Jedoch wird dies aufgrund von Designänderungen für Neodym und Tantal nur eine Brückentechnologie sein, da diese Rohstoffe mittlerweile substituiert und somit in neuen Produkten weniger oder gar nicht mehr verbaut werden. Bei Kobalt sind die Separierung und die Verwertung von Batterien zielführend. Aufgrund neuer Anforderungen an den Umgang mit energiereichen Batterien ist zu erwarten, dass als „Nebeneffekt“ auch die Verwertung rentabler wird, da eine spezifische Sammlung, Separierung und Behandlung aus Sicherheitsaspekten heraus notwendig ist. Deutlich komplexer ist die Situation für das Recycling von Dysprosium, Europium, Yttrium und Gallium. Die Barrieren treten entlang der gesamten Recyclingkette auf. Das Projekt endete mit einem offenen Ausblick hinsichtlich weiterem Forschungsbedarf; jedoch machten die Verfasser in jedem Fall deutlich, dass eine baldige großtechnische Umsetzung und somit Steigerung der Recyclingquoten nicht zu erwarten ist. Für alle Zielmetalle gilt übergreifend, dass eine Bündelung der Stoffströme als sinnvoll erachtet wird. Da die Recyclingketten länderübergreifend strukturiert sind, können internationale Kooperationen sowie eine Harmonisierung entsprechender Aktivitäten Grundbausteine für ein mögliches Recycling sein. Die Verfasser machten auch sehr deutlich, dass die Transparenz der Stoffströme sehr wichtig ist. Zudem spielt die Marktstabilität eine große Rolle, damit die notwendigen Investitionen in die Anlagen und die Infrastruktur getätigt werden, die derzeit ausstehen. Derzeit wird wenig bis gar nicht in

die Anlagen investiert. Bessere politische Rahmenbedingungen könnten eine Basis schaffen. Dies beinhaltet zum Beispiel die Einführung von Anreizsystemen für die Förderung von Endverwertungsquoten. Auf dieser Grundlage könnten so neue Geschäftsmodelle entstehen. Ein Lenkungsimpuls der Politik weg von Tonnage und hin zu qualitativ hochwertigen Stoffströmen wird als immanent angesehen.

### 3.3.3 cycLED (EU, FP7)

**Projekthalt:** cycLED war eine Kooperation von 13 Partnerorganisationen aus ganz Europa, die sich zum Ziel gesetzt haben, den Ressourcenkreislauf bei LED-basierten Produktsystemen über die ganze Lebensdauer hinweg zu optimieren. Das Projekt war Bestandteil des Themenbereichs Umwelt des EU-Rahmenprogramms RP7 (Siebtes Rahmenprogramm für Forschung und technologische Entwicklung). Als Anwendungsfelder wurden Straßenbeleuchtung, Industriedeckenbeleuchtung, Stehlampen für den Wohnraumeinsatz und Beleuchtungskörper für widrige Umstände (Räume mit erhöhter Schadstoffbelastung [wie Parkhäuser], Beleuchtung für sehr feuchte Einsätze [wie Beregnungsanlagen], etc.) definiert. Das Energiespar-Potenzial von LEDs ist signifikant, die Dominanz von LED im Leuchtmittelbereich wird immer ausgeprägter, die strategische Bedeutung der LED-Technologie spiegelt sich in der laufenden und kommenden Marktentwicklung wider. LED-basierte Produktsysteme enthalten viele Ressourcen wie Indium, Gallium oder Metalle der Seltenen Erden. Einige dieser Stoffe werden als kritische Rohstoffe eingestuft, zudem hat der Verkaufsstopp von China im Jahre 2011 die geopolitische Abhängigkeit vor Augen geführt. Daher ist, bei weiterem Wachstum von LED-Technologien und Märkten, die Optimierung der Ressourcennutzung eine zentrale Herausforderung, die im Projekt disziplinübergreifend untersucht wurde. Im Detail wurde von den Wissenschaftlern untersucht wie ein Beitrag zur Entkopplung des europäischen LED-Marktwachstums vom Ressourcenverbrauch aussehen könnte. Dabei spielt das Angebot an technischen Optimierungen, um die Ressourceneffizienz von LED-Produkten zu maximieren, eine zentrale Rolle. Auch die Entwicklung von Werkzeugen und Methoden, um auf Recycling-Potenziale zurückgreifen zu können war Forschungsgegenstand. Ein Arbeitspaket strebte an die Produktivität der Ressourcen in der Produktion von LEDs zu erhöhen. Dabei wurde u. a. untersucht, wie flächenspezifisch Sputter- und Laminierprozesse vollzogen werden können. Insbesondere beim Sputtern von Legierungsflächen wurden bisher zwar die Flächen gleichmäßig hergestellt, die Sputterkammer selbst wurde dabei aber großflächig mit den Legierungsbestandteilen bedeckt, was per se unerwünscht ist und Ressourcen verschwendet. Zudem wurden Versuche zur Optimierung der Zuverlässigkeit und Lebensdauer von LED-Produkten durchgeführt. Diese betrafen das LED-Package selbst, die Leiterplatte als Substrat der LEDs und die Ansteuerungselektronik. Ein letztes Arbeitspaket hatte den Schwerpunkt der Businessmodellentwicklung, um Lösungen in Form von öko-innovativen LED-Produkten zu promoten.

**Erkenntnisgewinn für das Forschungsvorhaben:** Positiv hervorzuheben ist, dass alle vier im Projekt entwickelten Demonstratoren später in die Serienfertigung überführt werden konnten. Die „radikal“ öko-innovativen Konzepte der ersten Entwürfe wurden jedoch bei keinem Hersteller bzw. Projektpartner in die Serienfertigung überführt. Zum einen waren die Hersteller davon überzeugt, dass ihre Kundschaft diese sehr ökologischen Ansätze nicht als besonders kaufrelevant einstufen würden, zum andern scheuten sie die höheren Kosten der sehr ökologischen Konzepte. Letztlich waren drei von vier Demonstratoren zwar ressourcenschonender, energieeffizienter und an sich recyclingfreundlicher als vergleichbare Vorgängermodelle, aber nur ein Demonstrator stellt beim Vergleich mit vergleichbaren Produkten eine deutliche Innovation dar. Die öko-innovativen Businessmodelle mussten im Projekt letztlich konventionellen Businessmodellen weichen. Die Forschungsergebnisse hinsichtlich der Rückgewinnung von Edel- und Sondermetallen waren durchweg ernüchternd. Wie schon im Projekt UPgrade beschrieben, haben die einzelnen Metalle ihre ganz eigenen Herausforderungen im Recycling. Allen gemeinsam war der verschwindend geringe Massen- und Gewichtsprozentanteil im Vergleich zu den sonstigen Stoffströmen wie Kunststoff, Aluminium, Stahl, etc. Die von den Projektpartnern definierten Aufkonzentrationswerte konnten in keinem Fall bei den Zielmetallen erreicht werden. Selbst der Versuch die Edel- und Sondermetalle in Summe auf etwa 10 Prozent aufzukonzentrieren, um sie in Spezialprozessen verarbeiten zu können, scheiterte bei weitem. In optimierten konventionellen Prozessen erreichte die aufkonzentrierte Fraktion zwischen 2-3 Prozent Edel- und Son-

dermetalle, womit keine Weiterbehandlung möglich war. Auch der Weiterbehandlungsprozess mit einer extern auf 10 Prozent angereicherten Fraktion (Edel- und Sondermetallpulver wurde händisch beigemischt) scheiterte ebenfalls. Die Möglichkeit die Aufkonzentration unter realen Bedingungen auf 10 Prozent zu erhöhen wurde zwar im Projekt diskutiert, eine Umsetzung erfolgte nicht, auch weil die Wirtschaftlichkeit sehr negativ eingeschätzt wurde. Für die zuvor genannten Zielmetalle erwies sich, wenn überhaupt, Indium als erfolgversprechend für weitere Versuche der Rückgewinnung, da Indium gegenüber anderen Edel- und Sondermetallen noch den höchsten Erlös beim Verkauf versprach.

### 3.3.4 Elektrohydraulische Zerkleinerung (EHZ)

**Projekthinhalte:** Im Gegensatz zu den vorherigen drei Projekten, die klar gefasst aus einem öffentlich geförderten Forschungsrahmenprogramm initiiert wurden, generiert sich das Forschungswissen hinsichtlich der EHZ aus mehreren Eigenforschungsaktivitäten, Entwicklungsprojekten und sonstigen öffentlichen Projekten. Bei der mechanischen Aufbereitung von Primär- und Sekundärrohstoffen ist die Zerkleinerung des Ausgangsmaterials häufig einer der ersten Prozessschritte. Neben der Erzeugung von verarbeitbaren Stückgrößen ist dabei vor allem ein guter Aufschluss der verschiedenen Bestandteile wichtig für den Erfolg der nachgeschalteten Klassier- und Sortierprozesse. Bei konventionellen Verfahren wie Brechen, Schneiden oder Schreddern wird der Aufschluss in der Regel durch die Stück- oder Korngröße bestimmt: Je höher der gewünschte Aufschluss, desto stärker muss zerkleinert werden. Bei vielen Verbundmaterialien führt intensives Zerkleinern jedoch weniger zu einem guten Aufschluss als vielmehr zu Problemen: Trotz des hohen Energieeintrags ist die Trennung der Stoffe oft noch unvollständig oder das Material ist so feinteilig, dass eine Klassierung oder Sortierung kaum mehr möglich ist. Die EHZ wirkt sehr für im Aufschluss und setzt an den Grenzflächen der unterschiedlichen Materialien an. Die gezielte Schwächung von Grenzflächen im Material ermöglicht eine material-spezifische Trennung, die weitgehend unabhängig ist vom Grad der Zerkleinerung. Das Ergebnis ist ein hoher Aufschluss bei geringer Fragmentierung: So viel wie nötig, so wenig wie möglich. An einzelnen Beispielen wie Festplatten konnte gezeigt werden, dass eine Zerlegung in verschiedene funktionale Einheiten möglich ist, die sich in ihrem Materialprofil deutlich unterscheiden und leicht zu identifizieren sind. Im Gegensatz dazu werden beim Schreddern wertvolle Komponenten wie Platinen oder Permanentmagnete zerstört und dadurch die Rückgewinnung der Rohstoffe erschwert. Das Verfahren selbst basiert auf Schockwellen, die durch gepulste Funkenentladungen entstehen und über ein flüssiges Trägermedium auf das Material übertragen werden. Durch diese kurzen, aber heftigen mechanischen Stöße werden gezielt Schwachstellen im Material angegriffen: Die Auftrennung erfolgt an makroskopischen Verbindungsstellen (geklebt, geschraubt) oder an mikroskopischen Grenzflächen (Korn- oder Phasengrenzen).

**Erkenntnisgewinn für das Forschungsvorhaben:** Das EHZ Verfahren ist insofern interessant, da es an einem Grundproblem der End-of-Life Prozessketten ansetzt, am Problem der sortenreinen Erfassung und Aufkonzentration von Stoffströmen. Die Verschleppung von insbesondere den Edel- und Sondermetallen ist in konventionellen Verfahren sehr groß, für viele Edel- und Sondermetalle kann bis heute davon ausgegangen werden, dass sie zum Großteil durch schlagende, reibende, etc. Verfahren in die massenrelevanten Fraktionen wie Kunststoffe, Aluminium, Eisen, etc. eingetragen werden und in deren Weiterverarbeitungsprozessen gänzlich verloren gehen bzw. als Verunreinigung angesehen werden. Das EHZ Verfahren kann zwei- bzw. mehrstufig gefahren werden, so können beispielsweise erst Gehäuse aufgebrochen werden, um bspw. Leiterplatten zu entnehmen, diese Leiterplatten werden dann wieder der EHZ-Anlage zugeführt, um die Entstückung der Leiterplatte vorzunehmen. Bisherige Versuche die Leiterplatten mit Schneidmessern, Oberflächenfräsen, etc. zu entstückten sind weitgehend erfolglos verlaufen, was diverse Gründe hat. Insbesondere die Projekte UPgrade und cycLED haben aber aufgezeigt, dass die Rückgewinnung von einzelnen Edel- und Sondermetallen sehr spezifisch sein kann und demnach elektronische Bauteile möglichst einzeln und lose vorliegen müssen, um diese Bauteile dann wieder in Chargen zu fassen und speziellen Recyclingverfahren zuzuführen. Aktuell werden die Leiterplatten bestück geschreddert und in Schmelzprozesse gegeben, bei denen dann wieder auf die individuellen Spezifika von Edel- und Sondermetallen nicht eingegangen werden kann. Letztlich gehen die in geringen Mengen vorkommenden Edel- und Sondermetalle verloren bzw. sam-

meln sich als Verunreinigung in Massenmetallen an. Die Entwicklung der EHZ ist heute noch nicht ausreichend weit fortgeschritten, um für einzelne Produktgruppen der Sammelgruppen 3 und 5 angewendet werden zu können. Dafür bedarf es noch weiterer Versuche zur optimalen Einstellung des Verfahrens. Die EHZ ist auch nur für End-of-Life Prozesse einsetzbar, die Wiederverwendung von entstückten Bauteilen ist nicht möglich, da durch die heftigen mechanischen Stöße das Bauteil als solches beschädigt wird.

### 3.3.5 Screening Erkenntnisgewinn

**Zusammengefasster Erkenntnisgewinn für das Forschungsvorhaben:** In den vier hier kurz vorgestellten und in den weiteren untersuchten Projekten wurden teils gute Forschungsergebnisse abseits des eigentlichen Forschungsschwerpunkt erzielt. Die Rückgewinnung der Massenmetalle wie Eisen, Kupfer und Aluminium ist technologisch gut machbar und wird in Affinerien (Scheideanstalt) erfolgreich umgesetzt. Die Rückgewinnung von vielen Edel- und Sondermetallen ist bis heute sehr schwierig oder unmöglich. Die Barrieren sind teils sehr speziell, in jedem Fall problematisch ist die zumeist sehr geringe Menge der Edel- und Sondermetalle am gesamten Produkt, was zur sehr hohen Verschleppungen in die Massenmetallströme führt. Die Abscheidung aus der Schmelze ist nicht trivial, insbesondere die Sondermetalle schwimmen nicht einfach oben oder unten und können gut abgeschöpft werden, vielmehr befinden sie sich in der Schmelze fein verteilt wieder. Die Marktpreise für Edel- und Sondermetalle sind stark volatil. Selbst bei hochpreisigen Sondermetallen wie Indium stehen Aufwand und Ertrag i. d. R. in schlechtem Verhältnis zueinander. Gold hat derzeit den höchsten Wert und setzt daher den Maßstab für Recyclingprozesse. Verfahren für Edel- und Sondermetalle, die zu Gold in Konkurrenz stehen, haben es schwer, da Gold in ökonomischen Überlegungen eine prioritäre Rolle insbesondere gegenüber Sondermetallen einnimmt.

Mit dem Produktdesign auf diese Forschungserkenntnisse zu reagieren ist nicht einfach. Zum einen weisen sie in eine Richtung nach dem Motto: ein Produkt, das seine Dienstleistung erfüllt, sollte so lange genutzt werden wie möglich. So wird per se die Ressourceneffizienz gesteigert, weil die eingesetzten Ressourcen über einen möglichst langen Zeitraum ihren Nutzen stiften. Zum anderen müsste ökologisches Design auf die Spezifika der Edel- und Sondermetalle bei der Rückgewinnung eingehen, was bedeutet, es sollten nur Produkte auf den Markt kommen, für die ein holistisches Recyclingkonzept besteht. Diese Betrachtung erfolgt in der Praxis aber nur in den aller seltensten Fällen, vielmehr ist der Edel- und Sondermetalleinsatz in Produkten durch Technologien und Kostenreduktion getrieben. Vor allem die Sondermetalle sind in den meisten Anwendungsfällen im Produkt in geringer Menge dort eingesetzt, wo sie eine Funktion erfüllen, ob sie am Ende der Produktnutzung gut zurückgewonnen werden können ist bisher zweitrangig. Die fortschreitende Miniaturisierung und der hohe Kostendruck haben zumindest dazu geführt, dass besonders kostenrelevante Edelmetalle wie Gold tendenziell in geringer werdenden Mengen je Produkt eingesetzt werden. Die Praxispartner sprechen heute davon, dass der Goldanteil um bis zu 75 Prozent in mobilen Informations- und Kommunikationsgeräten zurückgegangen ist (an sich kleinere Leiterplatten-Abmessungen, dünnere Leiterschichten, weniger Passivierungsschichten durch Goldabscheidung, etc.). Dies führt im Umkehrschluss potentiell aber auch zu geringeren Erlösen in der Recyclingkette, was wiederum den Aufwand absenkt, der zu einem möglichst umfänglichen stofflichen Recycling betrieben werden kann.

## 3.4 Fallstudie 1: Notebooks

Unter Notebooks wird in diesem Vorhaben ein tragbarer Computer im Sinne der Verordnung (EU) Nr. 617/2013 (Durchführungsmaßnahme für Computer unter der Ökodesign-Richtlinie) verstanden:

*„Computer, der speziell als tragbares Gerät und für den längeren Betrieb mit oder ohne direkten Anschluss an eine Wechselstromquelle konzipiert ist. Notebook-Computer verfügen über ein integriertes Anzeigegerät mit einer sichtbaren Bildschirmdiagonale von mindestens 22,86 cm (9 Zoll) und können mit einem integrierten Akku oder einer anderen tragbaren Stromquelle betrieben werden.“*

Im Speziellen befasst sich das Forschungsvorhaben mit Notebooks vornehmlich aus dem Privatkundenbereich (business-to-consumer, B2C). Tablets, Slates und mobile Thin-Clients gehören im Sinne des Forschungsvorhabens nicht in die Kategorie Notebooks.

### 3.4.1 Marktdaten und Altgeräteaufkommen

In Tabelle 7 sind der deutschland- und europaweite Absatz von Notebooks für das Jahr 2015, sowie Absatzprognosen für die Jahre 2020 und 2025 angegeben. 2015 wurden europaweit rund 42,2 Millionen Notebooks verkauft. Deutschland hatte an diesem Absatz mit rund 5,2 Millionen Geräten einen Anteil von rund 12 Prozent. Im Jahr 2020 wird europaweit mit einem Absatz von rund 41,7 Millionen Notebooks gerechnet. Für Deutschland wird der Anteil an diesem Absatz mit rund 4,1 Millionen Notebooks auf rund 10 Prozent taxiert. Für das Jahr 2025 wird europaweit ein Notebookabsatz von rund 41,6 Millionen verkauften Geräten prognostiziert. Bezogen auf das Bundesgebiet wird mit rund 3,8 Millionen verkauften Geräten gerechnet, oder einem Anteil von 9 Prozent.

Mit der Modellrechnung von Stobbe et al. (2015) und den in Tabelle 6 definierten Verweildauern wird das potentielle Altgeräteaufkommen für Notebooks in Deutschland abgeschätzt. Demnach wurden 2015 rund 4 Millionen Notebooks in deutschen Haushalten nicht mehr verwendet und ständen somit potentiell dem Recycling zur Verfügung. Im Jahr 2020 wird sich diese Zahl voraussichtlich auf rund 5,8 Millionen Geräte erhöhen und 2025 bei rund 5,7 Millionen Geräten liegen.

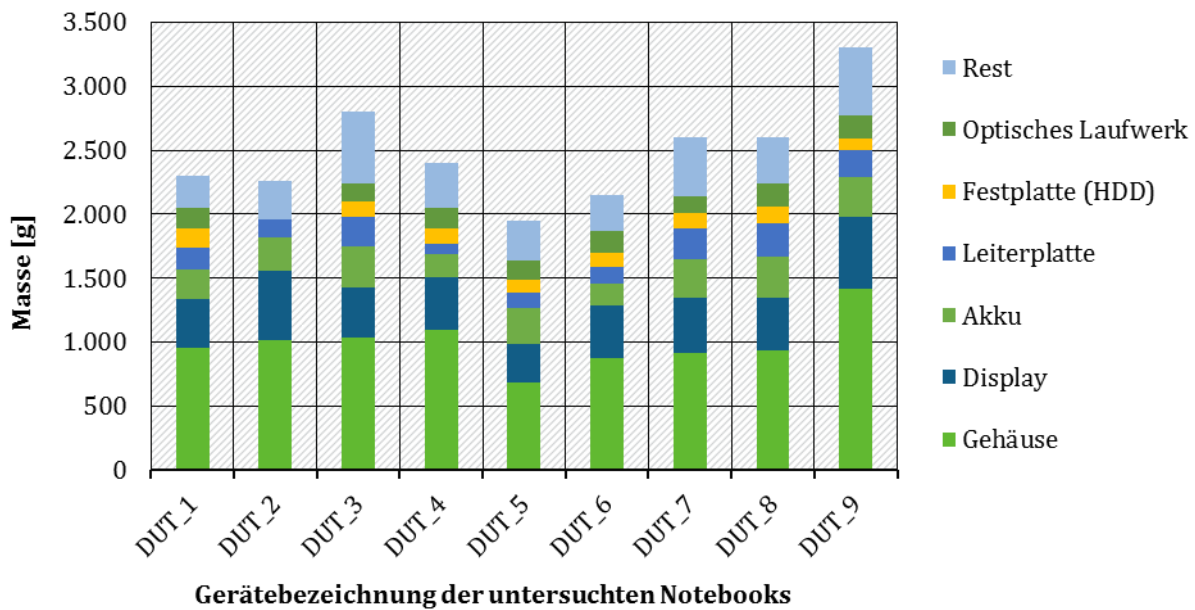
Tabelle 7: Notebooks: Absatz und potentielles Altgeräteaufkommen

	2015 [Mio. Stk.]	2020 [Mio. Stk.]	2025 [Mio. Stk.]
Absatz (EU) (Tecchio et al. 2017)	42,2	41,7	41,6
Absatz (D) (Stobbe et al. 2015)	5,2	4,1	3,8
Potentielltes Altgeräteaufkommen (D)	4,0	5,8	5,7

### 3.4.2 Stoffliche Zusammensetzung und Recyclingpotential

Die stoffliche Zusammensetzung mit Fokus auf die für das Vorhaben relevanten Zielstoffe (Kapitel 3.1.1) wurde anhand von Daten aus den durchgeführten Demontageversuchen (Kapitel 3.4.5) sowie Angaben aus der Literatur ermittelt. Abbildung 18 zeigt die Zusammensetzung der demontierten Notebooks nach den wesentlichen Komponenten. Die Massenanteile der Komponenten zwischen den verschiedenen Notebookmodellen unterscheiden sich nur unerheblich.

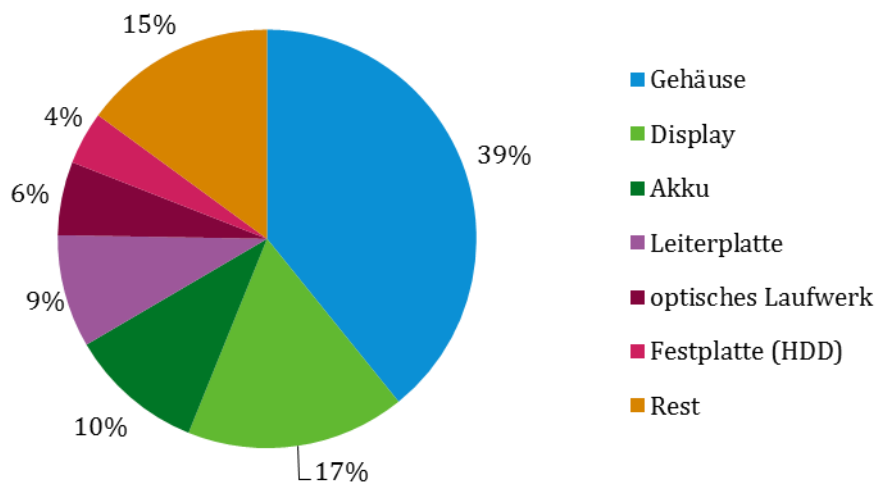
Abbildung 18: Massen der wesentlichen Komponenten der untersuchten Notebooks



Quelle: Eigene Darstellung, Technische Universität Berlin

Abbildung 19 zeigt die auf Basis der demontierten Geräte ermittelte durchschnittliche Zusammensetzung der Notebooks in der untersuchten Stichprobe. Das Gesamtgewicht des durchschnittlichen Notebooks liegt bei 2,53 kg. Das Gehäuse hat daran mit 39 Prozent den höchsten Anteil, gefolgt von der Displayeinheit mit 17 Prozent. Die Gerätebatterie und die verbauten Leiterplatten haben im Durchschnitt jeweils einen Anteil von rund 10 Prozent am Gesamtgewicht der untersuchten Notebooks.

Abbildung 19: Durchschnittliche Massenanteile der wesentlichen Komponenten der untersuchten Notebooks



Quelle: Eigene Darstellung, Technische Universität Berlin

In Tabelle 8 werden die potentiellen Massenströme der Zielstoffe im potentiellen Altgeräteaufkommen von Notebooks in den Jahren 2015, 2020 und 2025 dargestellt. Zur Hochrechnung der Gehalte der Zielstoffe im Altgeräteaufkommen wurden eigene Untersuchungen ausgewertet und auf Daten aus der Literatur zurückgegriffen. Dazu wird angemerkt, dass es nur um eine grobe Abschätzung der potentiell

im Altgeräteaufkommen enthaltenen Stoffmengen ging. Das Ziel dabei war es, anhand der hochgerechneten Größenordnungen die Relevanz von möglichen Ökodesign-Anforderungen einschätzen zu können. Auch lässt die Darstellung Vergleiche der Größenordnung der Stoffmengen zwischen den Fallstudien zu. So kann abgewogen werden, für welche der Fallstudien welche Stoffe vorrangig adressiert werden sollten. Diesem Ziel einer Grobabschätzung entsprechend wurde keine vertiefte Recherche und Auswertung von verfügbaren Daten aus wissenschaftlicher Literatur vorgenommen.

Die in dieser Arbeit fokussierten Edelmetalle sind überwiegend in den Leiterplatten der Notebooks verbaut. Für Kupfer ist unter den Edelmetallen mit Abstand der größte Stoffstrom zu erwarten. 2015 wird die Kupfermenge in den potentiell dem Recycling zur Verfügung stehenden Notebooks auf rund 274 Tonnen taxiert. Dieser Anteil steigt bis zum Jahr 2020 voraussichtlich auf rund 397 Tonnen und bleibt bis zum Jahr 2025 mit geschätzten 390 Tonnen nahezu konstant. Rund 87 Prozent der Kupfermenge lassen sich der Leiterplatte (printed circuit board, PCB) und der Gerätebatterie (Akku) zuordnen, wobei die Leiterplatten einen Gesamtanteil von rund 61 Prozent und die Gerätebatterie einen Anteil von rund 26 Prozent der gesamten Kupfermenge enthalten. Die Gold- und Palladiummenge im potentiellen Altgeräteaufkommen von Notebooks wird im Jahr 2015 auf jeweils rund 0,2 Tonnen geschätzt, erhöht sich bis ins Jahr 2020 voraussichtlich auf rund 0,3 Tonnen und bleibt im Jahr 2025 mit ebenfalls rund 0,3 Tonnen nahezu konstant.

Bei den Sondermetallen stellt Kobalt den größten Massenstrom dar, der mit über 99 prozentigem Anteil der Gerätebatterie zugeordnet wird. Im Jahr 2015 waren rund 124 Tonnen Kobalt in den potentiell dem Recycling zur Verfügung stehenden Notebooks verbaut. Dieser Anteil erhöht sich im Jahr 2020 auf rund 170 Tonnen und bleibt bis zum Jahr 2025 mit prognostizierten 167 Tonnen nahezu konstant. Tantal stellt den zweitgrößten potentiellen Massenstrom der Sondermetalle dar und findet sich mit rund 50 prozentigen Anteil in den „Solid State Disk“-Festplatten (SSD) und der Leiterplatte (PCB) der Notebooks wieder. 2015 hätten somit potentiell geschätzte 11 Tonnen Tantal dem Recyclingprozess zugeführt werden können. Im Jahre 2020 und 2025 erhöht sich dieser potentielle Massenstrom auf rund 15 Tonnen. Die Zahlen für Tantal erscheinen den Autoren der Studie als relativ hoch, es konnten jedoch keine aktuelleren Daten zu Anteil von Tantal in Leiterplatten und SSD Laufwerken identifiziert werden. Neodym wird in Notebooks überwiegend in Festplatten (HDD) und Lautsprechern verbaut. Sein Anteil am potentiellen Altgeräteaufkommen von Notebooks wird im Jahre 2015 auf rund 2,6 Tonnen taxiert und steigert sich auf voraussichtlich 3,7 Tonnen in den Jahren 2020 und 2025. Dabei ist zu erwähnen, dass seit einigen Jahren ein Technologiewechsel im Bereich der eingesetzten Massenspeicher weg von Festplattenlaufwerken (HDD) hin zu transistorbasierten Halbleiterlaufwerken (SSD) stattfindet. Konkrete Daten für den Marktanteil von Notebooks mit HDD, SSD oder hybriden HDD/SDD Lösungen konnten nicht identifiziert werden. Demnach wurde die vereinfachte Annahme getroffen, dass Geräte jeweils anteilig HDD und SSD enthalten. Indium wird überwiegend in den Displayeinheiten eingesetzt. Der Stoffstrom im potentiellen Altgeräteaufkommen von Notebooks wird im Jahre 2015 auf rund 0,4 Tonnen taxiert und steigt in den Jahren 2020 und 2025 auf rund 0,6 Tonnen an. Die Stoffmenge von Gallium aus Notebooks kann mit rund 9 Kilogramm im Jahr 2015 und 13 Kilogramm in den Jahren 2020 und 2025 für den Recyclingprozess als unbedeutend bewertet werden.

Die Kunststoffe machen den mit Abstand größten Stoffstrom am potentiellen Altgeräteaufkommen von Notebooks aus. Insgesamt wurden fünf verschiedene Polymere bzw. Polymerblends in den untersuchten Notebooks identifiziert. Die Gehäuse der untersuchten Notebooks waren mehrheitlich aus PC-ABS gefertigt. PC-ABS stellt mit rund 3800 Tonnen im Jahr 2015 den mit Abstand größten Anteil der Kunststoffe dar. Dieser Wert steigt voraussichtlich auf rund 5500 Tonnen im Jahr 2020 und 5400 Tonnen im Jahr 2025. PMMA liegt im Jahr 2015 bei 342 Tonnen und steigt bis in die Jahre 2020 und 2025 auf annähernd 500 Tonnen an. Die Stoffmengen der weiteren Kunststoffe sind im Vergleich von untergeordneter Bedeutung.

Tabelle 8: Potentielle Stoffmengen der Zielstoffe aus Alt-Notebooks in den Jahren 2015, 2020 und 2025; Komponenten mit dem größten Massenanteil des Zielstoffes

Stoff-kategorie	Zielstoff	Stoffmenge [t]			Komponente*	Datenquelle
		2015	2020	2025		
Edelmetall	Gold	0,2	0,3	0,3	PCB	(Chancerel und Marwede 2016)
	Silber	1,0	1,4	1,4	PCB	(Chancerel und Marwede 2016)
	Kupfer	274	397	390	PCB, Akku	(Clemm et al. 2016a; Chancerel und Marwede 2016)
	Palladium	0,2	0,3	0,3	PCB	(Chancerel und Marwede 2016)
Sondermetall	Kobalt	124	170	167	Akku	(Clemm et al. 2016a)
	Neodym	2,6	3,7	3,7	HDD	(Chancerel und Marwede 2016)
	Tantal	11	15	15	SSD, PCB	(Chancerel und Marwede 2016; Ardente und Mathieux 2012)
	Gallium	<0,1	<0,1	<0,1	PCB	(Chancerel und Marwede 2016)
	Indium	0,4	0,6	0,6	Display	(Böni et al. 2015)
Kunststoff	ABS	36	53	52	ODD	(Tecchio et al. 2017)
	PC-ABS	3.782	5.484	5.389	Gehäuse	Eigene Messung
	PC	33	49	47	ODD	(Tecchio et al. 2017)
	HIPS	-	-	-		(Tecchio et al. 2017)
	PMMA	342	495	487	Display	Eigene Messung

\*Es werden nur die ein bis zwei Komponenten mit dem deutlich höchsten Anteil eines Zielstoffes angegeben

### 3.4.3 Angenommenes Recyclingszenario

Die im Folgenden beschriebenen Annahmen beruhen auf Informationen aus dem Begleitkreis sowie ergänzenden Literaturrecherchen. Es wird das nach aktuellem Erkenntnisstand in Deutschland typische Recyclingszenario beschrieben. Die Beschreibung ist als spezifizierende Ergänzung zur allgemeinen Beschreibung der Behandlung und dem Recycling von EAG zu betrachten (Kapitel 3.2.3 ff). Das tatsächliche Verfahren mit den Altgeräten in der Praxis unterscheidet sich je nach Behandlungsanlage, deren Abnehmern, als auch Fluktuationen im Preis der produzierten Stoffströme, um nur einige der Einflussfaktoren zu benennen. Es besteht daher kein Anspruch auf Allgemeingültigkeit.

Notebooks gelten im Vergleich zu vielen EAG als hochwertige Geräte im Hinblick auf die enthaltenen Wertstoffe, als auch auf das Potential zur Entnahme von elektronischen Baugruppen für eine Wiederverwendung. Notebooks werden im Zuge der Erstbehandlung in der Regel zunächst manuell behandelt. Im ersten Schritt wird die Gerätebatterie (Akkumulator) im Sinne der Schadstoffentfrachtung manuell entnommen. Oftmals wird das Display anschließend zerstörend manuell vom Rest des Gerätes getrennt. Dies passiert insbesondere vor dem Hintergrund des historischen Einsatzes von quecksilber-

haltigen Leuchtröhren zur Hintergrundbeleuchtung. Teilweise werden weitere Baugruppen entnommen, beispielsweise der Arbeitsspeicher, Massenspeicher, oder andere Steckkarten, da hier ein Potential zur Wiederverwendung besteht. Die schadstoffentfrachteten Geräte werden anschließend mechanisch zerkleinert. Die entstehenden Stoffströme von bspw. Aluminium, Eisen, Kunststoffen und Buntmetallgemischen werden (teil-)automatisiert sortiert und in die Nachbehandlung gegeben.

In einem technischen Bericht zur Materialeffizienz der Produktgruppe Computer, inkl. Notebooks, von JRC wird von zwei wesentlichen Szenarien ausgegangen (Tecchio et al. 2017): Einer mechanischen Grobzerkleinerung nach manueller Schadstoffentfrachtung, oder einer weitergehenden manuellen Demontage des Notebooks. Diese beinhaltet die Entnahme von werthaltigen Baugruppen wie dem Mainboard und weiteren Leiterplatten zum Absatz an eine Kupferhütte, sowie die Entnahme von Festplatten und optischen Laufwerken zur groben mechanischen Zerkleinerung und Fraktionierung in Eisen-, Aluminium-, Magnet- und Leiterplattenfraktionen. Der Rest des Notebooks geht auch hier in eine Grobzerkleinerung und weitere Fraktionierung der Stoffströme und anschließende Nachbehandlung (Entsorgung, stoffliche Verwertung).

### **3.4.4 Bestehende Anforderungen**

Im Folgenden werden Anforderungen aus gesetzlichen sowie freiwilligen produktpolitischen Instrumenten aus verschiedenen Quellen zusammengefasst. Dabei werden ausschließlich Kriterien mit einer Relevanz für die Kreislaufführbarkeit von Werkstoffen einbezogen. Weitergehende Anforderungen an Akkumulatoren, beispielsweise an die Lebensdauer, werden in Teil II der Studie (Kapitel 4) betrachtet.

#### **Gesetzliche Anforderungen**

Die Maßgaben aus dem ElektroG sind in Kapitel 3.2.1 und Kapitel 3.2.3 zusammengefasst. Darüberhinausgehende Anforderungen an Notebooks sind im ElektroG nicht enthalten.

Verordnung (EU) Nr. 617/2013 zur Durchführung der Ökodesign-Richtlinie stellt Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung von Computern und Computerservern, einschließlich Notebooks. Der Fokus der Maßnahmen liegt auf Verbesserung der Energieeffizienz (Stromverbrauch). Maßnahmen zur Materialeffizienz sind nicht enthalten. Zwei relevante Maßnahmen mit Bezug zur technischen Lebensdauer und Austauschbarkeit von Akkumulatoren sind zusammengefasst in Kapitel 4.4.1.

Die Revision der Anforderungen an Notebooks unter der Ökodesign-Richtlinie ist seit Januar 2016 in Bearbeitung und sieht eine deutliche Ausweitung der Anforderungen an Notebooks im Sinne der Ressourcenschonung vor. Insbesondere der Entwurf der politischen Maßnahmen (Maya-Drysdale et al. 2017) enthält Vorschläge für weitergehende Anforderungen an Notebooks im Sinne der Ressourcenschonung, beispielsweise bzgl. der Reparierbarkeit und Entnehmbarkeit von Komponenten. Inwieweit die dort vorgeschlagenen Anforderungen in die Gesetzgebung überführt werden ist zum Zeitpunkt der Berichtsfassung noch nicht abzusehen.

#### **Umweltzeichen**

Im Folgenden werden die in Kapitel 3.2.2 eingeführten Umweltzeichen hinsichtlich ihrer materialeffizienzbezogenen Designanforderungen für Notebooks diskutiert. Im Mittelpunkt stehen die gestellten Anforderungen an die verwendeten Werkstoffe und die recyclinggerechte Konstruktion. In erster Linie werden die Anforderungen des Blauen Engel für Computer und Tastaturen (RAL-UZ 78 2017) diskutiert und punktuell durch ergänzende und weiterführende Anforderungen der anderen untersuchten Umweltzeichen ergänzt.

#### **Verwendete Werkstoffe**

Alle untersuchten Ökolabel definieren Anforderungen an die Gestaltung von Notebooks und verfolgen dabei die Strategie, die Recyclingfähigkeit von Kunststoffen durch die Begrenzung der verwendeten Materialvielfalt zu fördern.

#### Blauer Engel (RAL-UZ 78 2017):

- ▶ „Für Kunststoffteile mit einer Masse über 25 Gramm sowie Tastenkappen, sofern sie in Summe eine Masse über 25 Gramm aufweisen, gilt: Es sind maximal 4 Kunststoffsorten für diese Teile zugelassen. Die Kunststoffgehäuse dürfen insgesamt nur aus zwei voneinander trennbaren Polymeren oder Polymerblends bestehen.
- ▶ Die metallische Beschichtung von Kunststoffgehäuseteilen ist nicht erlaubt. Für tragbare Computer gilt die Ausnahme, dass die metallische Beschichtung von Kunststoffgehäuseteilen dann zulässig ist, sofern sie technisch erforderlich ist. Galvanische Beschichtungen von Kunststoffgehäuseteilen sind jedoch nicht zulässig.“

Des Weiteren versuchen speziell das Eco Mark Label, sowie in Ansätzen auch der Blaue Engel den Einsatz von Post-Consumer und biobasierten Kunststoffen zu fördern. Der Blaue Engel lässt die Verwendung von (Post-Consumer) Rezyklatmaterial ausdrücklich bei der Herstellung von Gehäuseteilen zu. Das Eco Mark Label geht einen Schritt weiter und definiert einen Mindestanteil von 10 Prozent (Post-Consumer) Rezyklat- und biobasiertem Kunststoff. Allerdings werden diese Anforderungen nicht verpflichtend festgelegt, sondern können von den Herstellern als optionale Anforderung erfüllt werden.

#### Blauer Engel:

- ▶ „Das (Post-Consumer) Rezyklatmaterial ist in Gehäuseteilen und Chassis zugelassen und kann anteilig eingesetzt werden.“

#### Eco Mark (Eco Mark Product Category No. 119)

- ▶ „The rate of post-consumer recycled plastics contained in the plastics used in the devices relative to the total plastic weight (excluding printed circuit boards and electronic components) is equal to or more than 10 %.
- ▶ The rate of biobased synthetic polymer contained in the plastics used in the devices relative to the total plastic weight (excluding printed circuit boards and electronic components) is equal to or more than 10 %.“

Um das Sortieren der verwendeten Kunststoffteile im Recycling zu erleichtern, schreiben alle untersuchten Umweltzeichen die Kennzeichnung der verwendeten Kunststoffe vor. Bei vier der sechs untersuchten Labels, einschließlich des Blauen Engels, wird eine Kennzeichnung nach dem internationalen Standard ISO 11469 unter Berücksichtigung der ISO 1043 Teil 1 – 4 für Kunststoffteile > 25 g und > 200 mm<sup>2</sup> gefordert.

#### Recyclinggerechte Konstruktion

Die von den Umweltzeichen definierten Anforderungen an das konstruktive Design von Notebooks zielen in erster Linie auf eine einfache und schnelle Zerlegung der Produkte in ihre recyclingrelevanten Komponenten ab. Der Blaue Engel, das European Ecolabel und das Nordic Ecolabel fordern, dass eine Zerlegung eines Notebooks von einer einzelnen (geschulten) Person zu bewältigen ist. Der Blaue Engel fordert ferner, dass dies mit Hilfe von, nicht näher definiertem, „*allgemein üblichem, im Handel erhältlichem Universalwerkzeug*“ möglich sein muss. Das European Ecolabel geht einen ähnlichen Weg und fordert, dass die Demontage mit „*handelsüblichen, gängigen Handwerkzeugen oder Elektrowerkzeugen (z.B. Zangen, Schraubendreher, Schneidmesser und Hämmer nach ISO 5742, ISO 1174, ISO 15601)*“ möglich ist. Das European Ecolabel fordert ferner, dass zertifizierte Produkte einen dokumentierten Demontagetest zu durchlaufen haben. Für Notebooks müssen hierfür alle

- ▶ Leiterplatten mit einer Fläche > 10 cm<sup>2</sup>
- ▶ TFT-Einheiten mit einer Fläche > 100 cm<sup>2</sup>
- ▶ LED-Hintergrundbeleuchtungen

► Akkumulatoren

entnommen werden. Ferner sind zusätzlich mindestens zwei der folgenden Komponenten und Teile während des Demontagetests zu demontieren:

- Festplattenlaufwerk
- Optisches Laufwerk
- Leiterplatten  $\leq 10 \text{ cm}^2$  und  $> 5 \text{ cm}^2$
- Lautsprecher
- Polymethylmethacrylat (PMMA)-basierte Lichtleiter (bei einer Bildschirmgröße  $> 100 \text{ cm}^2$ )

Zur Dokumentation der Demontagetests, sind die einzelnen Arbeitsschritte und die verwendeten Werkzeuge anzugeben und durch Fotografien und Videos beim Ausbau der Komponenten zu dokumentieren.

### 3.4.5 Demontageversuche mit Notebooks

Für Demontageversuche mit Notebooks aus dem B2C-Bereich standen dem Forschungsvorhaben neun Modelle von fünf verschiedenen Herstellern zur Verfügung. Eine Beschreibung der Geräte ist in Tabelle 9 aufgeführt. Wie in Kapitel 1.2 beschrieben, wurden die Demontagen möglichst zerstörungsfrei durchgeführt. Eine Behandlung der Geräte im Zuge der Erstbehandlung kann nur bedingt abgebildet werden. Dennoch erlauben die Demontagen detaillierte Erkenntnisse zu unterschiedlichen Designstrategien seitens der Hersteller sowie eine Abschätzung der Auswirkung auf die Kreislaufführbarkeit der enthaltenen Zielstoffe.

Tabelle 9: Beschreibung der untersuchten Notebooks

Gerät	Hersteller	Displaygröße	Markteintritt	Preis [Euro]	Spezifika
DUT_1	Hersteller 1	15,6"	2013	500	4 GB RAM, HDD, dGfX, Touchscreen
DUT_2	Hersteller 2	15,6"	2013	1000	8 GB RAM, SSD, dGfX, Touch Screen
DUT_3	Hersteller 3	15,6"	2013	450	8 GB RAM, HDD
DUT_4	Hersteller 4	15,6"	2014	250	2 GB RAM, HDD
DUT_5	Hersteller 2	14"	2013	500	4 GB RAM, HDD
DUT_6	Hersteller 1	15,6"	2014	400	4 GB RAM, HDD
DUT_7	Hersteller 2	15,6"	2012	450	4 GB RAM, HDD
DUT_8	Hersteller 2	15,6"	2011	650	4 GB RAM, HDD, dGfX
DUT_9	Hersteller 5	17,1"	2011	700	4 GB RAM, HDD, dGfX

DUT = Device Under Test; Preis bezieht sich auf den gerundeten Kaufpreis bei Markteintritt; GB = Gigabyte; RAM = Random Access Memory (Arbeitsspeicher); HDD = Festplattenlaufwerk; SSD = Solid State Drive; dGfX = dedizierte Grafikkarte

Die Geräte unterscheiden sich anhand verschiedener Funktionen und Merkmale. Beispielsweise hat DUT\_1 ein Touchscreen Display sowie eine dedizierte Grafikkarte. DUT\_2 wurde vom Hersteller als Gaming Laptop beworben und ist ebenfalls mit einer dedizierten Grafikkarte ausgestattet. Ebenfalls ist das Modell DUT\_2 mit einem Halbleiterlaufwerk (Solid-State-Drive, SSD) ausgestattet, während alle anderen Geräte über ein Festplattenlaufwerk (Hard Disk Drive, HDD) verfügen. Sieben der neun Geräte verfügen über ein Display mit einer Diagonalen von 15,6 Zoll, während ein Gerät mit 14 Zoll und

ein Gerät mit 17 Zoll dabei ist. Bei sechs Geräten besteht das Gehäuse aus dunklem (schwarzem/grauen) Kunststoff und bei zwei aus hellem (weißen/silbernen) Kunststoff. Bei DUT\_2 kommt ein Gehäuse aus Metall zum Einsatz.

DUT\_2 wird als das technisch am meisten fortgeschrittene Gerät angesehen (flache Bauform, Touchscreen, SSD, 8 GB RAM, Gehäuse aus Metall und Kunststoff, Bildschirm im Edge-to-Edge Design). Es folgt damit den Markttrends und dient am ehesten dem Erkenntnisgewinn bzgl. der aktuell am Markt verfügbaren Geräte.

Die Auswahl der Zielkomponenten ergibt sich weitestgehend aus den in Abbildung 19 und insbesondere den in Tabelle 8 dargestellten Massenanteile der Komponenten am Gesamtgerät und der Komponenten mit dem dominierenden Anteil der jeweiligen Zielstoffe. Dementsprechend sind die Komponenten besonders relevant, die den größten Anteil mindestens einer der Zielstoffe beinhalten.

Abbildung 20: Beispielhafte Darstellung der Zielstoffe und Zuordnung zu Notebook Komponenten



Quelle: Eigene Darstellung, Technische Universität Berlin

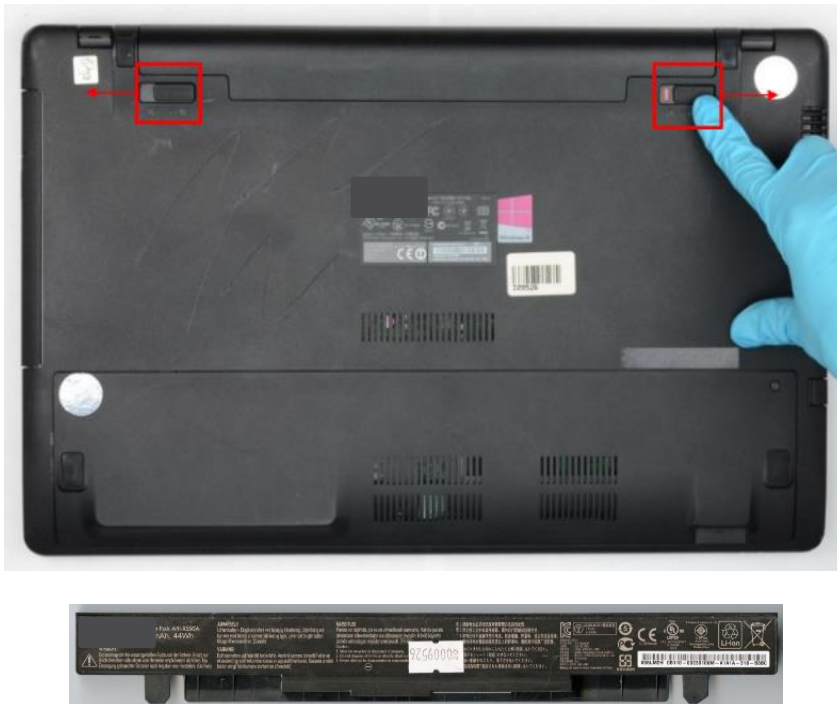
Bei der Demontage von Geräten wurde angestrebt, eine einheitliche Vorgehensweise zu etablieren. Zur Orientierung wurde der „Dismantling Guide for IT Equipment“ (Schluep et al. 2015) herangezogen. Die dort beschriebene Reihenfolge der Separierung von Komponenten konnte jedoch nicht immer eingehalten werden. Beispielsweise war bei vier der neun Geräte der Akku in das Gerät integriert und konnte daher nicht zu Beginn entnommen werden, wie im genannten Dokument beschrieben.

### Entnahme des Akkus

Der Akku war bei fünf der neun Geräte ohne den Einsatz von Werkzeug problemlos aus dem Gerät entnehmbar (DUT\_1, DUT\_3, DUT\_7, DUT\_8, DUT\_9). In den weiteren vier Geräten war der Akku in das Gehäuse integriert (DUT\_2, DUT\_4, DUT\_5, DUT\_6). Im Fall der Entnehmbarkeit ohne Werkzeuge kann der Akku in der Regel über das Lösen von zwei Riegeln manuell innerhalb weniger Sekunden entnommen werden (Abbildung 21). Der Akku liegt als Verbund mehrerer Zellen in einem festen Kunststoffgehäuse als Einheit vor. Die Gefahr einer Beschädigung des Akkupacks wird daher bei einer manuellen

Entnahme im Rahmen der Erstbehandlung als gering eingeschätzt. Alle manuell entnehmbaren Akkupacks lassen aufgrund ihres Formfaktors auf das Vorliegen von Rundzellen (prismatischen Zellen) schließen, die verschaltet in einem festen Kunststoffgehäuse vorliegen.

Abbildung 21: Manuelle Entnahme eines Notebooks Akkus anhand DUT\_1



Zur Entnahme des Akkus werden die beiden Riegel manuell gelöst (oben), anschließend der Akku vom Notebook gelöst und entnommen (unten)

Quelle: Eigene Darstellung, Technische Universität Berlin

Im Fall von integrierten Akkus ist ein erhöhter Aufwand zur Entnahme notwendig. Bei den vier Geräten mit integriertem Akku, der untersuchten Stichprobe, musste dabei zunächst das Gehäuse des Notebooks auf der Unterseite mittels Lösen von Schrauben geöffnet werden. Die Anzahl an zu lösenden Schrauben variierte zwischen neun (DUT\_6) und 17 Stück (DUT\_2). Bei einigen Notebooks wird nach dem Lösen der Schrauben die Keyboardeinheit durch das Lösen von Clips von der Gehäuseunterseite getrennt (Abbildung 22), wobei das Risiko zu Beschädigung von Verbindungskabeln besteht (bspw. Flachbandkabel vom Touchpad zum Mainboard). Die wesentlichen Baugruppen des Notebooks (Mainboard, Massenspeicher, Akku, usw.) sind bei dieser Designstrategie an die Gehäuseunterseite montiert.

Abbildung 22: Öffnen des Gehäuses zur Entnahme von integrierten Notebooks Akkus anhand DUT\_5 und DUT\_6



Zur Entnahme des Akkus werden zunächst auf der Geräteunterseite 15 Schrauben gelöst (DUT\_5, links), anschließend müssen Clips zwischen Geräteunterseite und Keyboardeinheit gelöst werden, um an das Innere zu gelangen. Beim Aufhebeln besteht hier die Gefahr der Beschädigung von Flachbandkabeln (DUT\_6, rechts), oder, beim Einsatz von Werkzeug, der Beschädigung des Akkus.

Quelle: Eigene Darstellung, Technische Universität Berlin

Eine andere Designstrategie ist es, dass nach dem Lösen der Schrauben an der Gehäuseunterseite diese vom Gerät entfernt wird. Die wesentlichen elektronischen Baugruppen sind in diesem Fall an der Keyboardeinheit montiert (Abbildung 23).

Abbildung 23: Öffnen des Gehäuses zur Entnahme von integrierten Notebooks Akkus anhand DUT\_2



Nach dem Lösen von 17 Schrauben (links) konnte die Gehäuseunterseite vom Gerät separiert werden, um Zugriff zu den wesentlichen elektronischen Baugruppen zu ermöglichen. Eine Schraube war durch einen Aufkleber verdeckt und damit nicht unmittelbar ersichtlich. Das Akkupack von DUT\_2 konnte nach dem Lösen des markierten Steckverbinders aus dem Gerät entnommen werden (rechts).

Quelle: Eigene Darstellung, Technische Universität Berlin

Nach dem Öffnen des Gehäuses lag der Akku nicht in jedem Fall unmittelbar zur Entnahme frei. Im Fall DUT\_5 wird der Akku beispielsweise z.T. von einer Tochterkarte (Audioboard) verdeckt, zu deren Entnahme vier Steckverbinder und zwei Schrauben gelöst werden mussten. Der Akku selbst war weiterhin mit einer Schraube und einem Steckverbinder mit dem Gehäuse bzw. dem Mainboard verbunden.

In der untersuchten Stichprobe wurden keine Klebstoffe verwendet, um die Akkupacks im Gerät zu befestigen.

Die integrierten Akkus der untersuchten Stichprobe lagen in allen Fällen als mehr oder minder zusammenhängende Akkupacks vor. Der Einsatz von vereinzelt Zellen, die lediglich durch Kabel miteinander und mit dem Batteriemanagementsystem verbunden sind, wurde nicht festgestellt. Im Gegensatz zu den manuell entnehmbaren Akkus sind die Zellen der integrierten Akkupacks nicht von einem festen Kunststoffgehäuse umschlossen, sondern lediglich von Folien. Zusätzlich verleihen Plastikrahmen dem Akkupack Steifigkeit, die jedoch im Vergleich zu den manuell entnehmbaren Akkupacks erheblich geringer ausfällt. Die Zellen selbst sind in der Regel von einem Aluminiumblech umgeben (Abbildung 25). Integrierte Akkus ermöglichen somit prinzipiell eine flachere Bauform und eine erhöhte volumetrische als auch gravimetrische Energiedichte im Vergleich zu wechselbaren Akkupacks, da sie ohne festes Kunststoffgehäuse auskommen.

Abbildung 24: Entnommene Akkupacks von DUT\_4 und DUT\_5



Die integrierten Akkupacks der untersuchten Stichprobe sind Zusammenschlüsse mehrerer Zellen, die von Folien und Kunststoffrahmen zusammengehalten werden. Weiterhin ist das Batteriemanagementsystem in Form einer kleinen Leiterplatte und einem Kabel zum Anschluss an das Mainboard Teil des Akkupacks.

Quelle: Eigene Darstellung, Technische Universität Berlin

Abbildung 25: In das Akkupack integrierte Leiterplatte nach Entfernen der umgebenden Kunststoffolie



Quelle: Eigene Darstellung, Technische Universität Berlin

In einem Fall lag ein integriertes Akkupack in der Form vor, die einem entnehmbaren Akku entspricht (Rundzellen in festem Gehäuse), d.h. hier wurde ein Akkupack integriert, das auch für eine Entnehmbarkeit ohne Werkzeug ausgelegt gewesen sein könnte (DUT\_6).

### Entnahme des Massenspeichers

Im Fall der Massenspeicher lagen in der untersuchten Stichprobe zwei verschiedene Verfahren zur Entnahme vor:

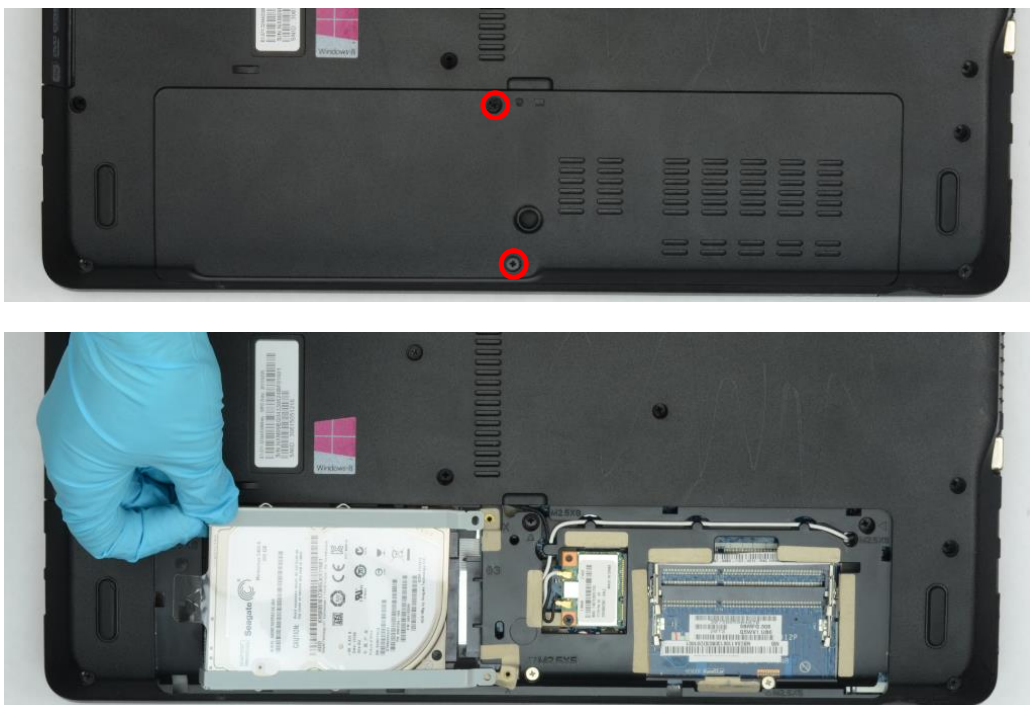
- ▶ Zugriff durch eine Wartungsklappe (bei 4 Geräten: DUT\_1, DUT\_7, DUT\_8, DUT\_9)
- ▶ Zugriff nach Öffnen des Gehäuses (bei 5 Geräten: DUT\_2, DUT\_3, DUT\_4, DUT\_5, DUT\_6)

Wartungsklappen sind i.d.R. auf der Geräteunterseite angebracht und lassen sich durch das Lösen weniger Schrauben öffnen. Darunter sind der Massenspeicher und der Arbeitsspeicher erreichbar. In einigen Fällen mussten weitere Schrauben gelöst werden, um den Massenspeicher entnehmen zu können. Der Arbeitsspeicher war in allen Fällen gesteckt und somit ohne den weiteren Einsatz von Werkzeug entnehmbar.

Die Geräte, bei denen der Massenspeicher durch eine Wartungsklappe entnehmbar ist, sind fast deckungsgleich mit den Geräten, bei denen der Akku ohne Werkzeug entnehmbar ist (mit Ausnahme von DUT\_3). Es liegen also Geräte mit zwei verschiedenen generellen konstruktiven Ansätzen vor:

- ▶ Geräte, bei denen eine einfache Austauschbarkeit bzw. Entnehmbarkeit von Komponenten durch den Hersteller vorgesehen ist, bzw.
- ▶ Geräte, bei denen alle Komponenten im Gehäuse integriert sind, ohne dass eine Austauschbarkeit bzw. Entnehmbarkeit ohne Öffnen des Gehäuses vorgesehen ist

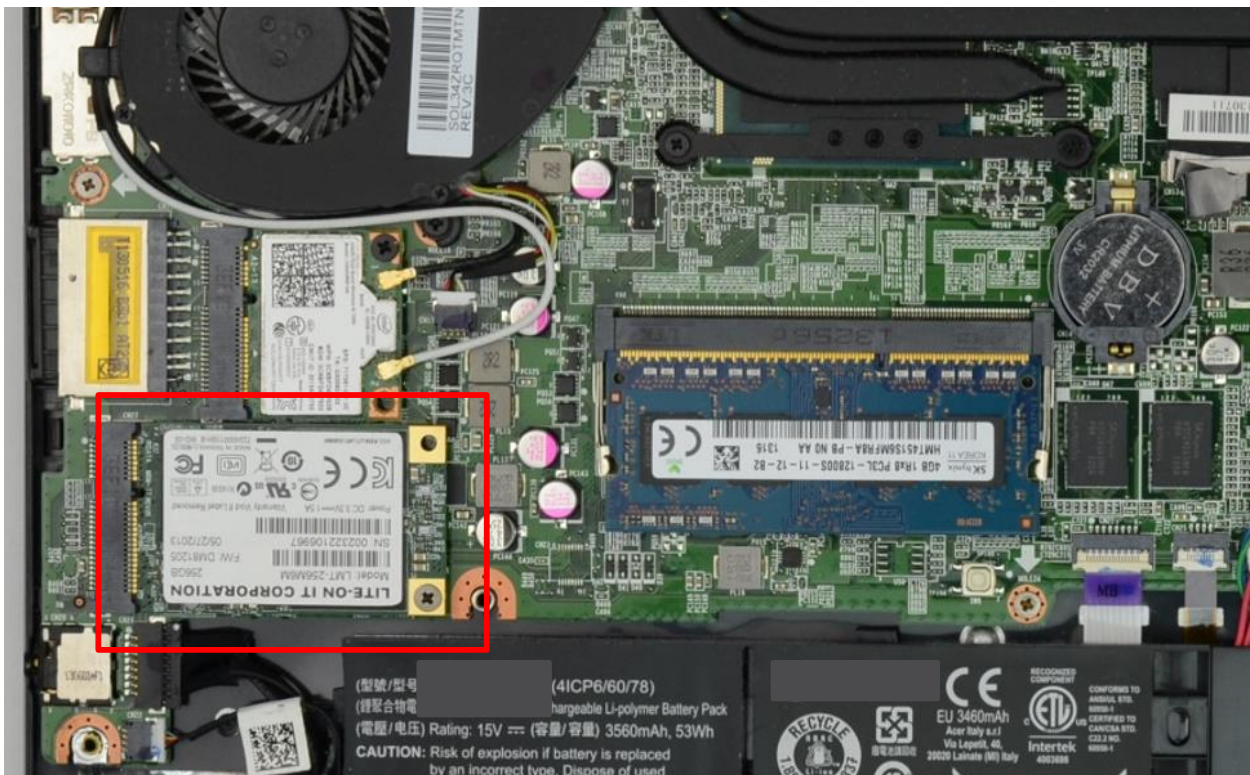
Abbildung 26: Entnahme der Festplatte aus einem Notebook mit Wartungsklappe



Lösen von zwei Schrauben und anschließende Möglichkeit zur Entnahme der Festplatte (links im Bild), der WiFi Karte (mittig) und des Arbeitsspeichers (rechts)

Quelle: Eigene Darstellung, Technische Universität Berlin

Abbildung 27: SSD Laufwerk als Steckkarte auf dem Mainboard von DUT\_2



SSD Laufwerke werden in Notebooks, analog zu Arbeitsspeicher, häufig ohne eigenes Gehäuse als Steckkarten montiert

Quelle: Eigene Darstellung, Technische Universität Berlin

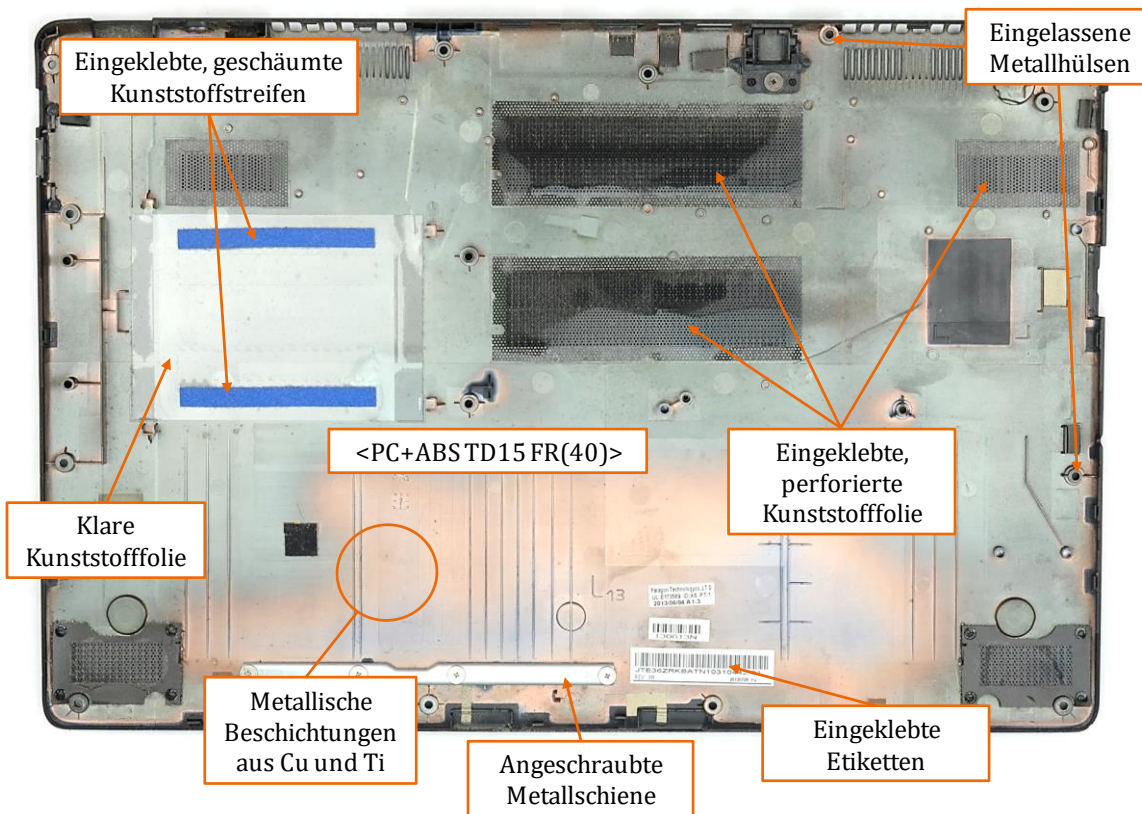
### Notebook Gehäuse

Die Gehäuse der Notebooks in der untersuchten Stichprobe bestehen in der Regel aus den folgenden, wesentlichen Elementen:

- ▶ Gehäuseoberseite
- ▶ Displayrahmen
- ▶ Keyboardrahmen
- ▶ Gehäuseunterseite

Wie eingangs beschrieben wurde im Zuge der Demontage zunächst die Gehäuseunterseite mittels Lösen von Schrauben und teilweise Lösen von Clips vom Keyboardrahmen getrennt. Mehrheitlich lag damit die Gehäuseunterseite als separates Teil vor. In den anderen Fällen sind die Baugruppen an der Gehäuseunterseite montiert und diese liegt erst frei nachdem alle Komponenten repariert wurden. Die Gehäuseunterseite ist jedoch selbst nach Separierung der Baugruppen ein Werkstück, das aus vielen unterschiedlichen Werkstoffen besteht. Zusätzlich zu den in Abbildung 28 dargestellten Teilen kommen auf der Unterseite der Gehäuserückseite weitere Etiketten sowie Gummifüßchen zum Einsatz, die das Gerät rutschfest machen.

Abbildung 28: Beispielhafte Darstellung der werkstofflichen Zusammensetzung eines Notebook Gehäuse-seiteils anhand DUT\_2



Die Gehäuseunterseite, hier anhand DUT\_2, besteht laut Kennzeichnung aus PC+ABS mit einem Talkumpulver zu 15 Prozent Masseanteil (TD15) sowie einem halogenfreien, organo-phosphor-basiertem Flammschutzmittel (FR40). Es kommt eine Kupferbeschichtung zum Einsatz (ca. 70 nm Schichtdicke), die mittels Titan als Haftvermittler aufgebracht wurde.<sup>10</sup> Es werden perforierte Folien eingesetzt, um Partikeleintritt über die Luftein- und -auslässe zu reduzieren. Weiterhin kommt geschäumter Kunststoff zum Einsatz, um die schocksensible Festplatte vom Gehäuse abzukoppeln. Eingelassene Metallhülsen ermöglichen das Festschrauben der Leiterplatten und anderer Baugruppen an der Gehäuseunterseite. Weiterhin werden Etiketten eingebracht sowie Metallschienen eingeschraubt.

Quelle: Eigene Darstellung, Technische Universität Berlin

Bei acht von neun untersuchten Geräten bestand das Gehäuse aus Kunststoff und eines aus Metall. Die Vielfalt der eingesetzten Polymere in den Kunststoffgehäuseteilen ist in Tabelle 10 dargestellt.

Tabelle 10: Kunststoffkennzeichnung in den wesentlichen Gehäuseelementen der untersuchten Notebooks

Gerät	Gehäuseoberseite	Displayrahmen	Gehäuseunterseite
DUT_1	PC+ABS	PC+ABS	PC+ABS
DUT_2	PC+ABS TD15 FR 40	n.v.	PC+ABS TD15 FR 40
DUT_3	PC+ABS TD15 FR 40	n.v.	PC+ABS TD15 FR 40
DUT_4	PC+ABS TD15 FR 40	PC+ABS TD15	PC+ABS TD15 FR 40

<sup>10</sup> Die Zusammensetzung und Schichtdicken wurden im Labor ermittelt.

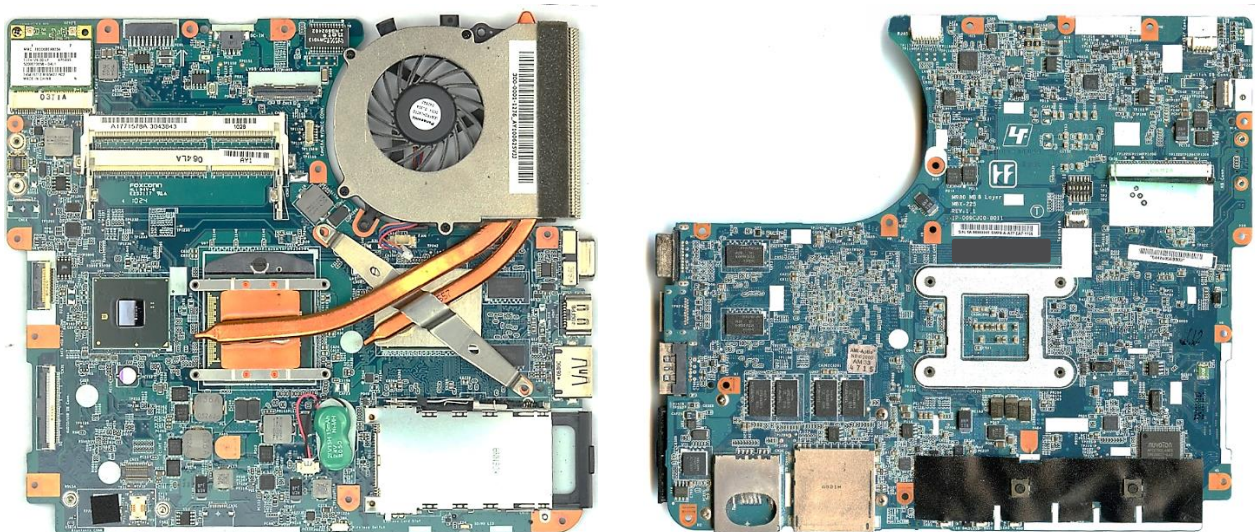
Gerät	Gehäuseoberseite	Displayrahmen	Gehäuseunterseite
DUT_5	n.v.	n.v.	PC GF FR40
DUT_6	PC+ABS	PC+ABS	PC+ABS
DUT_7	PC+ABS FR 40	PC+ABS TD15 FR 40	PC+ABS FR 40
DUT_8	PC+ABS FR 40	PC+ABS TD15 FR 40	PC+ABS FR 40
DUT_9	PC+ABS	PC+ABS	PC+ABS

Legende: PC = Polycarbonat; ABS = Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymer; TD15 = 15 Prozent; T-Talkum; D-Feinstoff, Pulver; FR40 =FR-Flammschutzmittel; 40-halogenfreie organische Phosphorverbindungen (ISO 11469, DIN EN ISO 1043-2, DIN EN ISO 1043-4); n.v. = Kennzeichnung nicht vorhanden

### Entnahme des Mainboards

Das Mainboard sowie eventuell eingesetzte Daughterboards sind als wesentliche Komponenten im Notebook integriert, mit allen Baugruppen verbunden und i.d.R. mittels Schraubverbindungen an eines der Gehäuseelemente montiert. Unmittelbar nach dem Öffnen des Gehäuses ist eine beschädigungsfreie Entnahme des Mainboards nicht möglich (vgl. Abbildung 22 und Abbildung 23). Zur Freilegung des Mainboards müssen zunächst verschiedene Komponenten und Steckverbinder entfernt werden (insbesondere Akkumulator), anschließend wird eine variierende Anzahl an Schrauben gelöst, die das Mainboard mit dem Gehäuse verbinden.

Abbildung 29: Teilweise entstücktes Mainboard von Notebook DUT\_9



DUT\_9 Mainboard Oberseite mit Kühleinheit (Kupfer-Heatpipes und Lüfter), ohne Arbeitsspeicher (links); Unterseite (rechts)

Quelle: Eigene Darstellung, Technische Universität Berlin

### Entnahme des Displays

Nach dem Lösen der Scharniere von der Gehäuseunterseite und einer Kabelverbindung kann die Displayeinheit vom Rest des Gerätes separiert werden. Die Gehäuseelemente (Gehäuseoberseite und Displayrahmen) werden von Clips zusammengehalten. Nach dem Lösen der Clips mittels eines spitzen Werkzeugs (z.B. Schlitzschraubendreher) kann das Displaymodul separiert werden (Abbildung 30). Die einzelnen Komponenten liegen dann i.d.R. separat vor. Dazu gehören das Displaypanel und LED-

Streifen, Polarisationsfolien, eine PMMA Scheibe und die elektronische Ansteuerung des Panels und der Hintergrundbeleuchtung.

Abbildung 30: Separierung des Displaymoduls von Gehäuseteilen anhand DUT\_5



Der Displayrahmen ist mittels Clips mit der Gehäuseoberseite verbunden. Nach dem Öffnen der Clips lässt sich die Displayeinheit (LCD und Ansteuerung) vom Gehäuse separieren (Bild rechts).

Quelle: Eigene Darstellung, Technische Universität Berlin

### 3.4.6 Ergänzende Erkenntnisse

Ergänzend zu den durchgeführten Demontageversuchen werden im Folgenden zusätzliche Erkenntnisse aus Literaturrecherchen und Informationen aus dem Begleitkreis zum Forschungsvorhaben zusammenfassend dargestellt.

#### Weitere Erkenntnisse zu Notebook-Akkumulatoren

In Gesprächen mit Herstellern im Begleitkreis zum Forschungsvorhaben wurde als ein wesentlicher Grund für das Integrieren von Akkumulatoren in Notebooks ein Sicherheitsrisiko benannt. Bei Geräten mit manuell durch den Nutzenden wechselbaren Akkus besteht demnach die Gefahr, dass auf preislich günstige Ersatzakkus von Drittanbietern, anstatt auf die originalen Ersatzteile des Geräteherstellers, zurückgegriffen wird. Für diese kann der Hersteller jedoch die Sicherheit nicht gewährleisten. Weiterhin wird eine verbesserte Wärmeabführung vom Akkupack über das Gerätegehäuse angeführt, sowie die Möglichkeit, Geräte mit einem dünneren Formfaktor zu konstruieren. Nach Ansicht einiger Experten gilt daher, dass das beste Gehäuse für einen Akkumulator das Endgerät selbst ist.

Ein Austauschen des Akkus durch den Nutzer ist nur dann problemlos möglich, wenn entsprechende Ersatzteile zur Verfügung stehen. Anhand von stichprobenhaften Recherchen verschiedener Modelle und Hersteller wurde deutlich, dass Ersatzakkus nur für solche Geräte direkt vom Hersteller bezogen werden können, bei denen der Akku nicht in das Gerät integriert ist. Dies lässt sich wiederum durch mögliche Sicherheitsrisiken begründen, die vorliegen können, wenn ein Ersatzakku kein festes Kunststoffgehäuse aufweist, da der Transport als auch den Prozess des Austauschens durch den Nutzer potenzielle Risiken birgt. Ersatzakkus sind jedoch oftmals dennoch von Drittanbietern verfügbar, deren Qualität vor dem Kauf kaum durch den Konsumenten eingeschätzt werden kann. Dabei kann ein qualitativ minderwertiger Akku im besten Fall eine kurze Laufzeit oder eine stark begrenzte Lebensdauer aufweisen und im schlechtesten Fall ein Sicherheitsrisiko für den Nutzer darstellen.

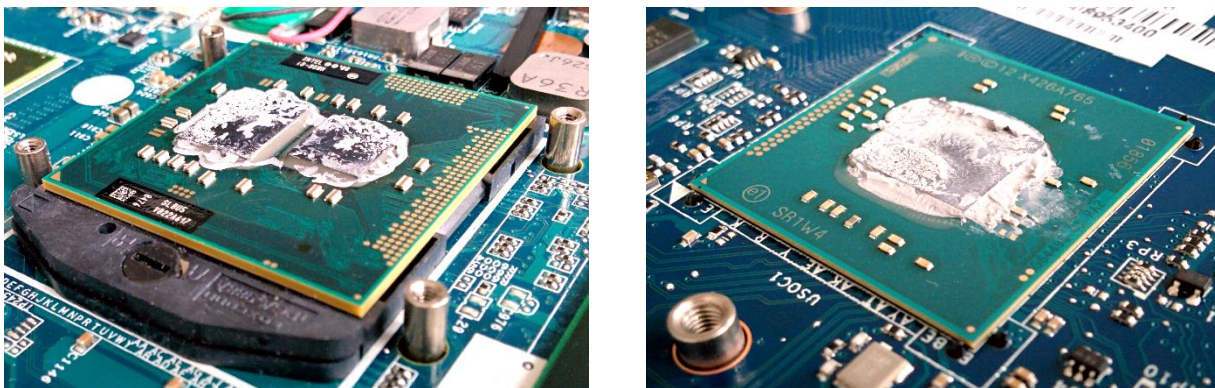
## Weitere Erkenntnisse zur Integration elektronischer Baugruppen

Analog zu Flachbildschirmfernsehern und Smartphones schreitet auch die erhöhte Integrationsdichte bei Notebooks weiter voran. So ist auch hier der Trend zur weiteren Integration von Bauteilen zu erkennen, die bislang reversibel als Steckkarten mit dem Mainboard verbunden waren, aber mittlerweile vermehrt direkt auf die Leiterplatte gelötet werden. Dies betrifft z.B. die Baugruppen

- ▶ Prozessor (CPU)
- ▶ Grafikkarte (GPU)
- ▶ Arbeitsspeicher (RAM)
- ▶ Massenspeicher (SSD)

Abbildung 31 zeigt beispielhaft einen Notebook IC (integrated circuit, „Chip“) der mittels PGA (Pin Grid Array) auf einen Sockel auf der Leiterplatte montiert ist und sich mittels eines Mechanismus entnehmen lässt (Lösen einer Verriegelung mittels Schraubendrehers) sowie ein Notebook IC der mittels BGA (Ball Grid Array) direkt auf die Leiterplatte gelötet ist. BGA Baugruppen lassen sich nur mittels Wärmezufuhr ablösen. Im B2C-Bereich haben sich fest verlötete CPUs gegenüber gesockelten Lösungen durchgesetzt.

Abbildung 31: Beispiel von Notebook ICs mit PGA (links) und BGA (rechts) Technologie



Quelle: Eigene Darstellung, Technische Universität Berlin

Während RAM und SSD bislang noch häufig als Steckkarten (Leiterplatten) reversibel mit dem Mainboard verbunden werden, gibt es seit einigen Jahren vermehrt Notebooks, bei denen auch diese Baugruppen mittels BGA an das Mainboard gelötet werden. Dennoch kommen selbst bei vielen Ultrabooks nach wie vor RAM und SSD Steckkarten zum Einsatz.

Eine umweltseitige Bewertung der verschiedenen Verbindungstechniken im Sinne der Materialeffizienz kann im Rahmen dieses Vorhabens nicht erfolgen, daher werden im Folgenden kurz zu bedenkende Vor- und Nachteile diskutiert. Zum einen erlaubt die hohe Integrationsdichte gewisse Materialeinsparungen, beispielsweise Leiterplattenfläche und Metallisierungen an Kontakten (einschl. Gold). Dem gegenüber steht der somit erschwerte Austausch von Baugruppen im Zuge von Reparatur-, Aufbereitungs- und Demontageprozessen. Es stellt sich letztlich die Frage, mit welcher Häufigkeit Austausch und Entnahme dieser Baugruppen in der Praxis tatsächlich Anwendung finden.

### 3.4.7 Zusammenfassung

Für den Notebookabsatz werden über den Zeitraum von 2015 bis 2025 sinkenden Absatzzahlen prognostiziert. Beim potentiellen Altgeräteaufkommen wird mit einem steigenden Trend bis 2020 bzw.

2025 gerechnet. Für das potentielle Abfallaufkommen im Jahre 2020 und 2025 werden nahezu gleichbleibende Gerätezahlen erwartet. Neben den Edelmetallen sind im potentiellen Altgeräteaufkommen von Notebooks speziell Kobalt, Tantal und Neodym in recyclingrelevanten Mengen zu erwarten. Bei den untersuchten Notebooks ist PC-ABS der mit Abstand am häufigsten verwendete Polymerwerkstoff.

Insgesamt lässt sich im Bereich der Notebooks ein Trend ablesen hin zur höheren Integration von elektronischen Baugruppen. Dies betrifft neben Akkus auch den Prozessor, Arbeitsspeicher und Massenspeicher. Für das Recycling der in Notebooks enthaltenen Ressourcen ist die Möglichkeit der einfachen und zügigen Separierung des Akkus in der Erstbehandlung ein essentieller Schritt. Für Prozessor, Arbeitsspeicher und Massenspeicher ist unter Umständen eine leichte Separierung für eine Weiternutzung sinnvoll. Falls der Massenspeicher als Festplatte (HDD) verbaut wird, ist auch hier eine leichte Separierung sinnvoll, als Voraussetzung für eine mögliche Wiedergewinnung von Neodym aus Permanentmagneten.

Der Fokus bei der Entwicklung von Anforderungen an das Produktdesign liegt zunächst auf der Entnehmbarkeit von Akkumulatoren. Diese enthalten in Summe ein erhebliches Mengenpotential der untersuchten Zielstoffe, insbesondere Kobalt und Kupfer. Weiterhin werden bei einigen Notebookkomponenten Potentiale für eine Wiederverwendung gesehen, insbesondere Arbeitsspeicher und Massenspeicher. Gehäusekunststoffe sind bei Notebooks komplexe Materialverbünde. Sie stellen einen Massenanteil von fast 40 Prozent im Durchschnitt der untersuchten Stichprobe. Dennoch wird zum aktuellen Zeitpunkt das Potential, die Recyclingfähigkeit mittels Ökodesign-Anforderungen deutlich zu erhöhen, als gering eingeschätzt.

### 3.5 Fallstudie 2: Smartphones

#### 3.5.1 Marktdaten und Altgeräteaufkommen

In Tabelle 11 sind der deutschlandweite und weltweite Absatz von Smartphones für das Jahr 2015, sowie die Absatzprognosen für die Jahre 2020 und 2025 angegeben. Für den weltweiten Absatz von Smartphones wird mit einer Steigerung der verkauften Einheiten gerechnet. Im Jahr 2015 lag der weltweite Absatz bei rund 1.437,2 Millionen verkauften Einheiten und wird sich bis 2020 voraussichtlich auf rund 1697 Millionen Smartphones steigern (IDC 2017b). Die in Deutschland abgesetzten Smartphones repräsentieren im Jahr 2015 entsprechend rund 1,7 Prozent des weltweiten Smartphoneabsatzes. Dieser Anteil geht laut den Prognosen auf rund 1,3 Prozent zurück. So wurden im Jahr 2015 in Deutschland rund 25,1 Millionen Einheiten verkauft, im Jahr 2020 wird mit einem Absatz von rund 21,9 Millionen, im Jahr 2025 von 21,4 Millionen Einheiten gerechnet.

Dem mittels der angenommenen Verweildauer abgeschätzte Altgeräteaufkommen zufolge wurden 2015 rund 5,6 Millionen Smartphones in deutschen Haushalten nicht mehr verwendet und ständen potentiell dem Recycling zur Verfügung. Im Jahr 2020 wird sich diese Zahl voraussichtlich auf rund 22,4 Millionen Geräte und bis zum Jahr 2025 auf rund 25,8 Millionen Geräte erhöhen.

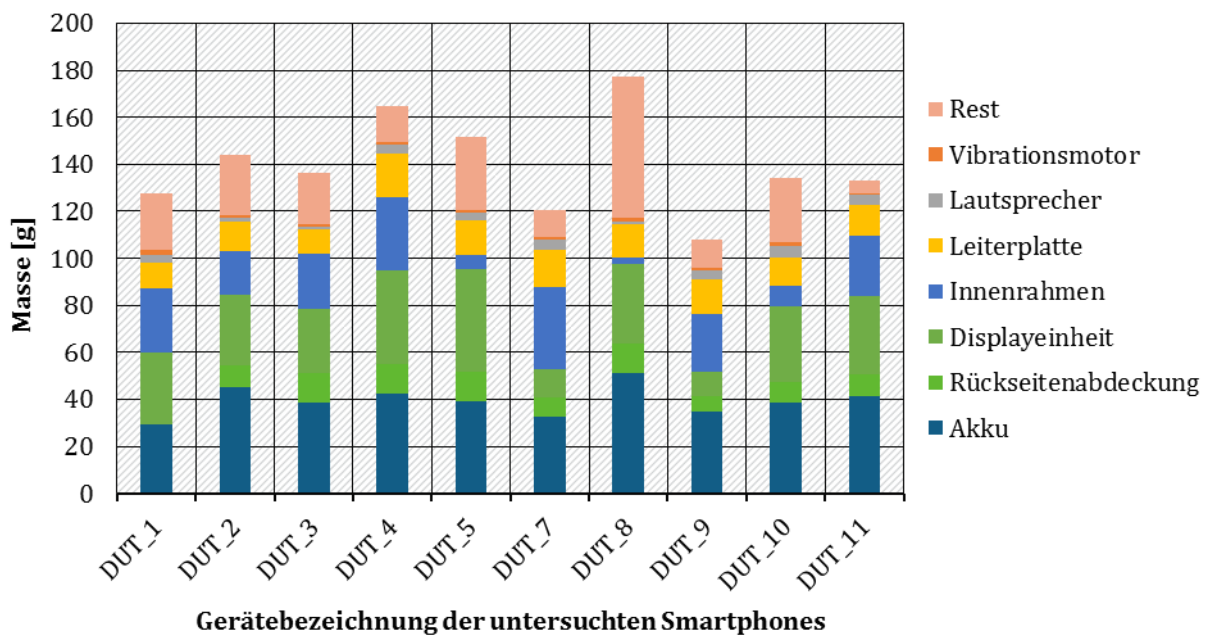
Tabelle 11: Smartphones: Absatz und potentielles Altgeräteaufkommen

	2015 [Mio. Stk.]	2020 [Mio. Stk.]	2025 [Mio. Stk.]
Absatz (weltweit) (IDC 2017b)	1437,2	1697	-
Absatz (D) (Stobbe et al. 2015)	25,1	21,9	21,4
Potentielltes Altgeräteaufkommen (D)	5,6	22,4	25,8

### 3.5.2 Stoffliche Zusammensetzung und Recyclingpotential

Die stoffliche Zusammensetzung mit Fokus auf die für das Vorhaben relevanten Zielstoffe (Kapitel 3.1.1) wurde anhand von Daten aus den durchgeführten Demontageversuchen (Kapitel 3.5.5) sowie Angaben aus der Literatur ermittelt. Abbildung 32 zeigt die Zusammensetzung der demontierten Smartphones nach den wesentlichen funktionellen Komponenten. Die Massenanteile der Komponenten zwischen den verschiedenen Smartphone-Modellen unterscheiden sich hauptsächlich beim Innenrahmen und der Displayeinheit. Die Massenanteile der weiteren Komponenten unterscheiden sich nur unerheblich.

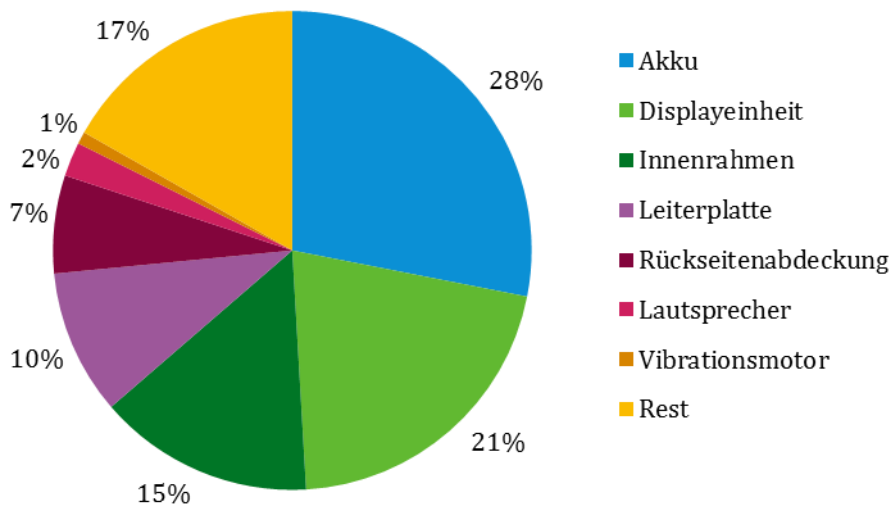
Abbildung 32: Massen der wesentlichen Komponenten der untersuchten Smartphones



Quelle: Eigene Darstellung, Technische Universität Berlin

Abbildung 33 zeigt die auf Basis der demontierten Geräte ermittelte durchschnittliche Zusammensetzung der Smartphones in der untersuchten Stichprobe. Das Gesamtgewicht des durchschnittlichen Smartphones liegt bei 140 Gramm. Die Batterie hat daran mit 28 Prozent den höchsten Anteil, gefolgt von der Displayeinheit mit 21 Prozent. Die verbauten Leiterplatten beanspruchen durchschnittlich 10 Prozent des Gesamtgewichtes.

Abbildung 33: Durchschnittliche Massenanteile der wesentlichen Komponenten der untersuchten Smartphones



Quelle: Eigene Darstellung, Technische Universität Berlin

In Tabelle 12 werden die potentiellen Stoffmengen der Zielstoffe resultierend aus dem potentiellen Altgeräteaufkommen von Smartphones in den Jahren 2015, 2020 und 2025 dargestellt und den Komponenten mit den größten Zielstoffanteilen zugeordnet. Zur Hochrechnung der Stoffmengen der Zielstoffe wurden eigene Untersuchungen ausgewertet und auf Werte aus vorherigen Veröffentlichungen zurückgegriffen. Dazu wird angemerkt, dass es nur um eine grobe Abschätzung der potentiell im Altgeräteaufkommen enthaltenen Stoffmengen geht. Das Ziel dabei war es, anhand der hochgerechneten Größenordnungen die Relevanz von möglichen Ökodesign-Anforderungen einschätzen zu können. Auch lässt die Darstellung Vergleiche der Größenordnung der Stoffmengen zwischen den Fallstudien zu. So kann abgewogen werden, für welche der Fallstudien welche Stoffe vorrangig adressiert werden sollten. Diesem Ziel einer Grobabschätzung entsprechend wurde keine vertiefte Recherche und Auswertung von verfügbaren Daten aus wissenschaftlicher Literatur vorgenommen.

Die in dieser Arbeit fokussierten Edelmetalle sind überwiegend in den Leiterplatten und in der Gerätebatterie der Smartphones verbaut. Die Stoffmenge von Kupfer hat unter den betrachteten (Halb-) Edelmetallen den mit Abstand größten Anteil. Im Jahr 2015 wird die Kupfermenge aus Alt-Smartphones auf rund 33 Tonnen taxiert. Dieser Anteil steigt bis zum Jahr 2020 voraussichtlich auf rund 130 Tonnen an und erhöht sich bis zum Jahr 2025 auf geschätzte 150 Tonnen. Über 90 Prozent der gesamten Kupfermenge lassen sich der Leiterplatte (PCB) und der Gerätebatterie (Akku) zuordnen, wobei die Leiterplatten einen Gesamtanteil von rund 45 Prozent (2,6 Gramm) und die Gerätebatterie einen Anteil von 47 Prozent (2,7 Gramm) der gesamten Kupfermenge enthalten. Die Menge Gold aus Alt-Smartphones wird im Jahre 2015 auf rund 0,2 Tonnen taxiert und steigt voraussichtlich im Jahre 2020 auf rund 0,8 Tonnen, beziehungsweise im Jahre 2025 auf rund 1 Tonne an.

Unter den betrachteten Sondermetallen stellt Kobalt den größten Massenanteil dar, der mit über 99 prozentigem Anteil der Gerätebatterie zugeordnet wird. Im Jahr 2015 waren rund 13 Tonnen Kobalt in den potentiell dem Recycling zur Verfügung stehenden Smartphones enthalten. Dieser Anteil erhöht sich im Jahr 2020 auf rund 50 Tonnen und steigt bis zum Jahr 2025 auf prognostizierte 58 Tonnen weiter an. Neodym stellt den zweitgrößten potentiellen Massenanteil der Sondermetalle in der Smartphonefraktion dar und wird überwiegend in den Lautsprechern verbaut. Im Jahr 2015 standen dem Recyclingprozess potentiell 1,2 Tonnen Neodym zur Verfügung. Im Jahre 2020 und 2025 erhöht sich dieser potentielle Massenstrom auf rund 4,9 bzw. 5,6 Tonnen. Für Tantal, Gallium und Indium

wurden Massenströme deutlich kleiner einer Tonne ermittelt und werden für den Recyclingprozess daher als vergleichsweise unbedeutend bewertet.

Als einziger nennenswerter Kunststoff wurde Polycarbonat (PC) in einigen Rückseitenabdeckungen der Geräte identifiziert. Die Autoren gehen davon aus, dass 2015 potentiell rund 49 Tonnen Polycarbonat in nicht mehr genutzten Smartphones verbaut waren. Die in Smartphones verbaute Menge an Polycarbonat steigt voraussichtlich in den Jahren 2020 und 2025 auf 197 Tonnen bzw. 227 Tonnen.

Tabelle 12: Potentielle Stoffmengen der Zielstoffe aus Alt-Smartphones in den Jahren 2015, 2020 und 2025; Komponenten mit dem größten Massenanteil des Zielstoffes

Stoff-kategorie	Zielstoff	Stoffmenge [t]			Komponente*	Datenquelle
		2015	2020	2025		
Edelmetall	Gold	0,2	0,8	1,0	PCB	(Sander et al. 2012)
	Silber	0,1	0,3	0,4	PCB	(Sander et al. 2012)
	Kupfer	33	130	150	PCB, Akku	(Proske et al. 2016; Michaud 2017)
	Palladium	0,1	0,3	0,4	PCB	(Sander et al. 2012)
Sondermetall	Kobalt	13	50	58	Akku	(Proske et al. 2016)
	Neodym	1,2	4,9	5,6	Lautsprecher	(Böni et al. 2015)
	Tantal	0,1	0,5	0,6	PCB	(Michaud 2017)
	Gallium	<0,1	<0,1	<0,1	PCB	Eigene Messung
	Indium	<0,1	<0,1	<0,1	Display	(Böni et al. 2015)
Kunststoff	ABS					
	PC-ABS					
	PC	49	197	227	Rückseite	Eigene Messung
	HIPS					
	PMMA					

\*Es werden nur die ein bis zwei Komponenten mit dem deutlich höchsten Anteil eines Zielstoffes angegeben

### 3.5.3 Angenommenes Recyclingszenario

Die im Folgenden beschriebenen Annahmen beruhen auf Informationen aus dem Begleitkreis sowie ergänzenden Literaturrecherchen. Es wird das nach aktuellem Erkenntnisstand in Deutschland typische Recyclingszenario beschrieben. Die Beschreibung ist als spezifizierende Ergänzung zur allgemeinen Beschreibung der Behandlung und dem Recycling von EAG zu betrachten (Kapitel 3.2.3 ff). Das tatsächliche Verfahren mit den Altgeräten in der Praxis unterscheidet sich je nach Behandlungsanlage, deren Abnehmern, als auch Fluktuationen im Preis der produzierten Stoffströme, um nur einige der Einflussfaktoren zu benennen. Es besteht daher kein Anspruch auf Allgemeingültigkeit.

Smartphones gelten im Vergleich zu vielen EAG als besonders hochwertige Geräte im Hinblick auf die Konzentration der enthaltenen Wertstoffe. Es wird angemerkt, dass nach Aussagen der Erstbehandlungsanlagen im Begleitkreis des Forschungsvorhabens Smartphones momentan nur in sehr geringen Stückzahlen in der Erstbehandlung ankommen und daher die Behandlungsprozesse noch nicht abschließend etabliert sind. Diese Aussage steht in Kontrast zur Abschätzung des potentiellen Altgeräteaufkommens in Kapitel 3.5.1. Es kann vermutet werden, dass ein erheblicher Anteil der potentiellen Altgeräte beim Nutzer gelagert wird, und die im Forschungsvorhaben angenommene Verweildauer

von fünf bis sechs Jahren (Kapitel 3.1.2) unterschätzt ist. Dennoch kann davon ausgegangen werden, dass die Stückzahlen in Erstbehandlungsanlagen in den kommenden Jahren deutlich zunehmen werden.

Im Zuge der Erstbehandlung wird der Akkumulator im Sinne der Schadstoffentfrachtung manuell aus dem Smartphone entfernt. Es wird angenommen, dass keine weiteren manuellen Demontageschritte vorgenommen werden und dass der Rest des Gerätes als Ganzes zur stofflichen Verwertung an eine Kupferhütte verbracht wird. Diese Annahme wird mit der hohen Konzentration an Wertstoffen in einem vergleichsweise kleinen Gerät begründet. In einer weiteren Variante, die durch eine Erstbehandlungsanlage im Begleitkreis beschrieben wurde, wird nach der manuellen Entnahme des Akkumulators auch das Displaymodul (Displayglas, Displaypanel, ggf. Metallrahmen) als Fraktion mit geringem Wertstoffgehalt manuell vom Gerät separiert. So wird die Wertstoffkonzentration der verbleibenden Fraktion weiter erhöht.

### **3.5.4 Bestehende Anforderungen**

Im Folgenden werden Anforderungen aus gesetzlichen sowie freiwilligen produktpolitischen Instrumenten aus verschiedenen Quellen zusammengefasst. Dabei werden ausschließlich Kriterien mit einer Relevanz für die Kreislaufführbarkeit von Werkstoffen einbezogen. Weitergehende Anforderungen an Akkumulatoren, beispielsweise an die Lebensdauer, werden in Teil II der Studie (Kapitel 4) betrachtet.

#### **Gesetzliche Anforderungen**

Die Maßgaben aus dem ElektroG sind in Kapitel 3.2.1 und Kapitel 3.2.3 zusammengefasst. Darüberhinausgehende Anforderungen an Smartphones sind im ElektroG nicht enthalten. Zum Zeitpunkt der Berichtsfassung existiert keine Durchführungsmaßnahme unter der Ökodesign-Richtlinie für Smartphones. Für die Produktgruppe wurde im Arbeitsplan zur Ökodesign-Richtlinie 2016 - 2019 lediglich angekündigt, dass die Europäische Kommission zunächst eine tiefere Prüfung hinsichtlich der Ressourcenschonungspotentiale vorsieht, um zu entscheiden ob Smartphones in den Arbeitsplan aufgenommen werden.

#### **Umweltzeichen**

Im Folgenden werden die in Kapitel 3.2.2 eingeführten Umweltzeichen hinsichtlich ihrer materialeffizienzbezogenen Designanforderungen für Smartphones diskutiert. Im Mittelpunkt stehen die gestellten Anforderungen an die verwendeten Werkstoffe und die recyclinggerechte Konstruktion. In erster Linie werden die Anforderungen des Blauen Engel für Mobiltelefone (RAL-UZ 106 2017) diskutiert und punktuell durch ergänzende und weiterführende Anforderungen der anderen untersuchten Umweltzeichen ergänzt. Generell formulieren von den sechs untersuchten Labeln nur der Blaue Engel, das TCO Label und das EPEAT Label Anforderungen an das Produktdesign von Smartphones. Bei den anderen drei untersuchten Labeln ist eine Auszeichnung von Smartphones entsprechend nicht möglich.

#### **Verwendete Werkstoffe**

Vom Blauen Engel werden, neben den üblichen Verboten von gesundheitsgefährdenden und ökotoxischen Materialien und Zusätzen, keine besonderen Anforderungen an die verbauten Materialien in Mobiltelefonen gestellt. Bei EPEAT müssen alle Plastikteile > 25 g mit ihrem Gesamtgewicht und der stofflichen Zusammensetzung gelistet werden. Des Weiteren soll der Einsatz von „post-consumer“ und biobasierten Kunststoffen gefördert werden. Hierzu wird vom EPEAT Label die Angabe des Anteils an „post-consumer recycled“ (PCR)- und biobasierten Kunststoffen in den verbauten Komponenten gefordert. Das TCO Label fordert eine Materialkodierung von Kunststoffen bereits ab einer Komponentenmasse von fünf Gramm.

## Recyclinggerechte Konstruktion

Als einzige konstruktive Anforderung fordert der Blaue Engel die leichte Entnehmbarkeit des Akkumulators. Dabei wird ein Richtwert von fünf Sekunden für die Demontage durch geschultes Fachpersonal mit nicht näher definiertem Universalwerkzeug, angegeben. Außerdem dürfen beim Demontageprozess keine Chemikalien aus der Batterie austreten. Das EPEAT Label fordert, dass der Hersteller eine Anleitung zur Verfügung stellen muss, durch die geschultes Fachpersonal in der Recyclingbranche ertüchtigt wird, das Gehäuse des Smartphones zu demontieren und den Zugang zum Display, zur Leiterplatte und der Batterie zu ermöglichen. Neben der Demontageanleitung ist auch eine Liste der hierzu benötigten Werkzeuge bereitzustellen. Nicht zulässig ist, dass Klebstoffe Demontageprozess verhindern. Als optionale Anforderungen wird eine Vereinheitlichung der bei der Demontage zu entfernenden Schraubenköpfe definiert.

### 3.5.5 Demontageversuche mit Smartphones

Für Demontageversuche mit Smartphones standen dem Forschungsvorhaben neun Geräte von sechs verschiedenen Herstellern zur Verfügung. Eine Beschreibung der Geräte ist in Tabelle 13 aufgeführt. Insbesondere die Hersteller 1 und 4 gehören zu den Marktführern im Smartphone Bereich, was auch durch den Marktanteil im jeweiligen Referenzjahr abgebildet wird.

Tabelle 13: Beschreibung der untersuchten Smartphones

Bezeichnung	Hersteller	Displaygröße [Zoll]	Markteintritt	IP Schutzklasse	Marktsegment*	Marktanteil**
DUT_1	Hersteller 1	5,1	2015	IP68	Hoch	3 %
DUT_2	Hersteller 1	5,1	2014	IP67	Hoch	5 %
DUT_3	Hersteller 1	5,5	2012	-	Hoch	5 %
DUT_4	Hersteller 2	5	2015	IP68	Mittel	<1 %
DUT_5	Hersteller 3	5	2015	-	Hoch	<1 %
DUT_6	Hersteller 4	3,5	2011	-	Hoch	n/a
DUT_7	Hersteller 4	5,5	2014	-	Hoch	6 %
DUT_8	Hersteller 5	5	2014	-	Mittel	<1 %
DUT_9	Hersteller 6	4,95	2013	-	Mittel	n/a

DUT = Device Under Test; \* Preisspanne bei Markteintritt: hoch = Preisspanne > 400 €; mittel = 200 – 400 €; niedrig = >200 €; \*\* Referenzjahr ist das Jahr des Markteintrittes oder das Folgejahr (Counterpoint Research 2017)

Die Geräte unterscheiden sich anhand verschiedener Eigenschaften. Beispielsweise besteht das Gehäuse von DUT\_7 aus Metall, die von DUT\_1 und DUT\_6 aus Glas und die anderen aus Kunststoff. Hervorzuheben sind DUT\_1 und DUT\_7 als sog. „Flagship“ Modelle zweier marktführender Hersteller und die damit einhergehenden hohen Absatzzahlen. Diese Geräte sind daher am relevantesten für die Untersuchung von aktuellem Produktdesign und die Ableitung von Ökodesign Maßnahmen. Weiterhin hervorzuheben ist DUT\_5 als Gerät, das explizit für Reparaturfähigkeit konzipiert ist.

Ebenfalls in Tabelle 13 angegeben ist die IP Schutzklasse, soweit diese vom Hersteller angegeben wird. Die IP (International Protection) Zertifizierung seitens der Internationalen Elektrotechnischen Kom-

mission (IEC) belegt, dass das Gerät so konstruiert ist, dass ein Eindringen von Staub und Wasser verhindert wird. Die IP-Schutzklassen werden nach DIN EN 60529<sup>11</sup> bzw. ISO 20653:2013<sup>12</sup> mittels zweier Kennziffern spezifiziert. Die erste Kennziffer steht dabei für den Schutz vor dem Eindringen von festen Fremdkörpern (z.B. Staub), die zweite für den Schutz vor dem Eindringen von Flüssigkeiten (Wasser). Die Schutzklasse IP67 bedeutet beispielsweise den Schutz vor dem Eindringen von Staub („staubdicht“) sowie gegen das Eindringen von Wasser bei zeitweiligem Untertauchen. Bei IP68 ist das Gerät sogar permanent vor dem Eindringen von Flüssigkeiten geschützt („wasserdicht“). Dabei ist zu beachten, dass nur der Schutz vor dem Eindringen von Süßwasser, nicht jedoch von Salzwasser, Kaffee, Säften und weiteren Flüssigkeiten gemeint ist. In der untersuchten Stichprobe sind die Geräte DUT\_1 und DUT\_4 sind nach IP68 vor dem Eindringen von Fremdkörpern und Flüssigkeiten geschützt, das Gerät DUT\_2 ist nach IP67 zertifiziert, während die anderen Geräte keine solche Zertifizierung haben.

Wie in Kapitel 1.2 beschrieben, wurden die Demontagen möglichst zerstörungsfrei durchgeführt. Eine Behandlung der Geräte im Zuge der Erstbehandlung kann nur bedingt abgebildet werden. Dennoch erlauben die Demontagen detaillierte Erkenntnisse zu unterschiedlichen Designstrategien seitens der Hersteller sowie eine Abschätzung der Auswirkung auf die Kreislaufführbarkeit der enthaltenen Zielstoffe.

Die Auswahl der Zielkomponenten ergibt sich weitestgehend aus den in Abbildung 33 und insbesondere Tabelle 12 dargestellten Massenanteilen der Komponenten am Gesamtgerät und der Komponenten mit dem dominierenden Anteil der jeweiligen Zielstoffe. Dementsprechend sind die Komponenten besonders relevant, die den größten Anteil mindestens einer der Zielstoffe beinhalten Auswahl der Zielkomponenten.

Zielkomponenten:

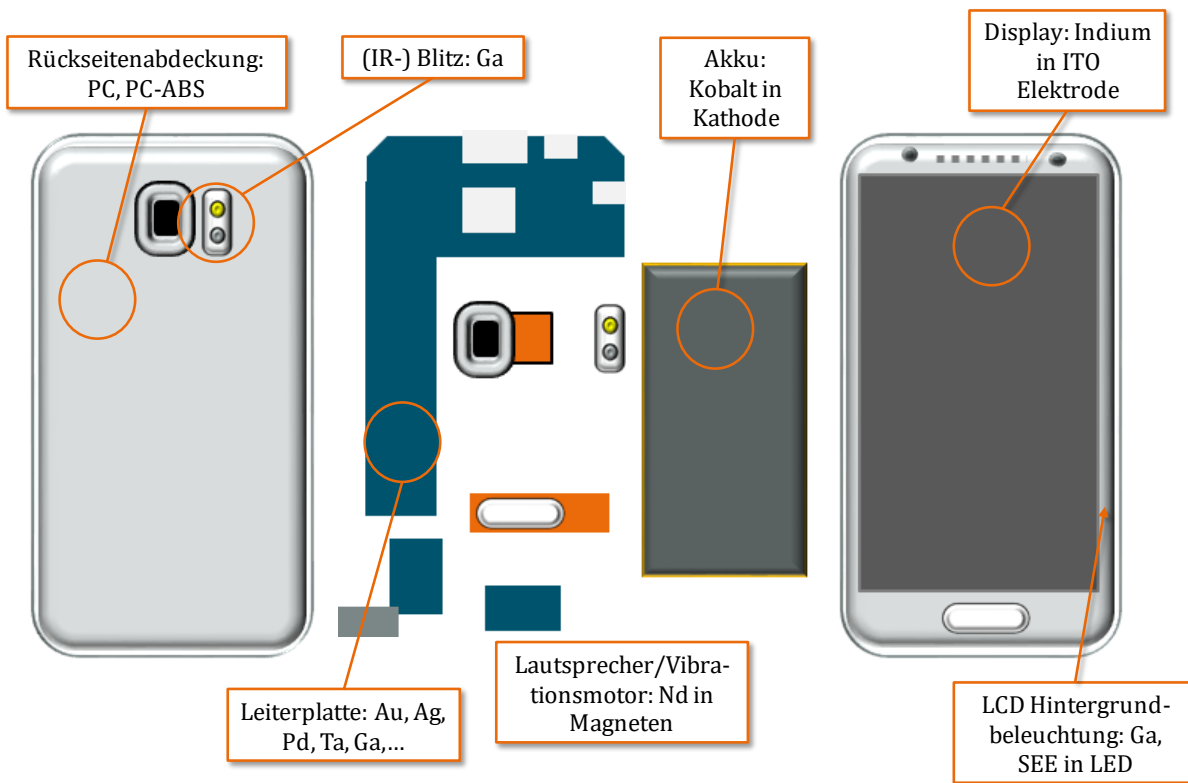
- ▶ Akku
- ▶ Display
- ▶ Leiterplatten

---

<sup>11</sup> DIN EN 60529 (VDE 0470-1):2014-09 Schutzarten durch Gehäuse (IP-Code)

<sup>12</sup> ISO 20653:2013 Straßenfahrzeuge - Schutzarten (IP-Code) - Schutz gegen fremde Objekte, Wasser und Kontakt - Elektrische Ausrüstungen

Abbildung 34: Beispielhafte Darstellung der Zielstoffe und Zuordnung zu Smartphone Komponenten



Quelle: Eigene Darstellung, Technische Universität Berlin

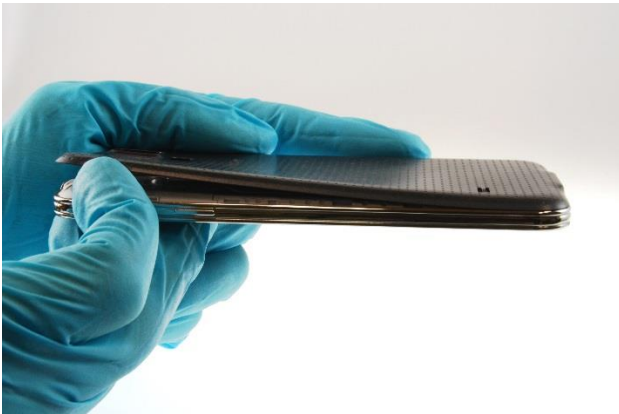
### Entnahme des Akkus

Bei drei der neun untersuchten Smartphones konnte der Akku manuell entnommen werden, wie beispielhaft anhand DUT\_2 in Abbildung 35 dargestellt. Hier waren lediglich zwei Arbeitsschritte notwendig und der Einsatz von Werkzeug war nicht erforderlich. Der Vorgang zur Entnahme der Akkus aus DUT\_3 und DUT\_5 ist praktisch identisch.

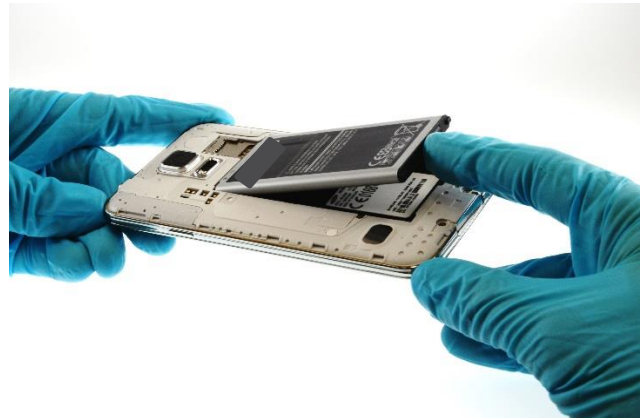
Die IP67 Zertifizierung von DUT\_2 steht offenbar nicht im Widerspruch zu einem manuell entnehmbaren Akku. Erreicht wurde dies durch die Verwendung von Gummidichtungen an der Rückseitenabdeckung sowie der Multifunktionsbuchse (USB Port).

Abbildung 35: Arbeitsschritte zur Entnahme eines manuell entnehmbaren Akkus anhand DUT\_2

Schritt 1: Abnehmen des Rückseitenabdeckung



Schritt 2: Herausnehmen des Akkus



Die Rückseitenabdeckung ist mittels Clips am Gerät angebracht und lässt sich manuell entfernen (links). Anschließend kann der Akku entnommen werden (rechts).

Quelle: Eigene Darstellung, Technische Universität Berlin

Bei Smartphones mit integriertem Akkumulator war der Aufwand zur Entnahme im Vergleich zu Geräten mit manuell entnehmbarem Akku erhöht, variierte aber erheblich zwischen den Geräten. DUT\_6 dient als Beispiel für ein Gerätedesign, dass trotz integriertem Akku die Entnahme mit geringem Aufwand ermöglicht. Im deutlichen Kontrast dazu steht DUT\_1, bei dem ein deutlich erhöhter Aufwand zur Akkuentnahme erforderlich war (Beschreibung erfolgt weiter unten). Bei DUT\_6 wurden zunächst zwei Schrauben an der Geräteaußenseite gelöst, um die Rückseitenabdeckung vom Gerät zu separieren (Abbildung 36). Nach dem Lösen einer weiteren Schraube des gleichen Typs im Geräteinneren konnte der Akku über eine dafür vorgesehene Lasche aus dem Gerät herausgehoben werden. Der unter dem Akku eingesetzte Klebstoff löst sich dabei ohne die Einwirkung von Wärme ab.

Abbildung 36: Arbeitsschritte zur Entnahme eines integrierten Akkus anhand DUT\_6

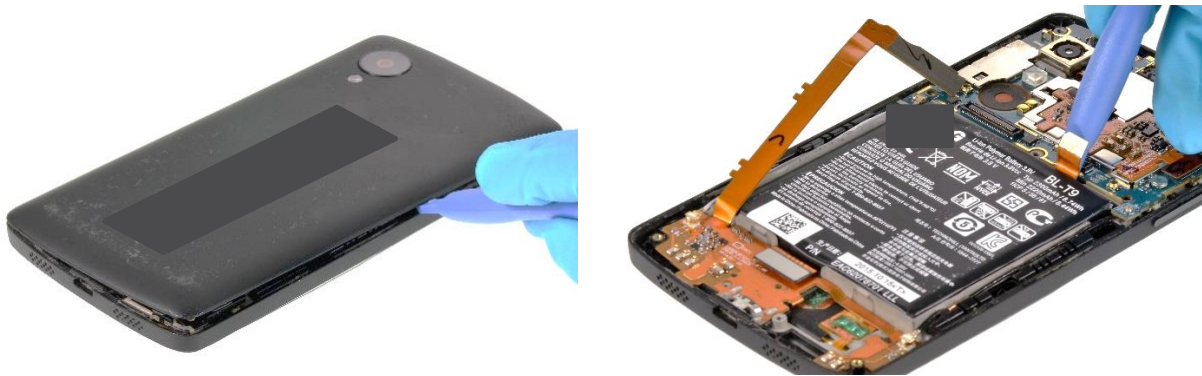


Nach dem Lösen von zwei Schrauben konnte die Rückseitenabdeckung von DUT\_6 manuell separiert werden (links). Anschließend konnte der Akku, nach dem Lösen einer weiteren Schraube des gleichen Typs, über eine Lasche aus dem Gerät herausgehoben werden, wobei sich der eingesetzte Klebstoff unter dem Akku ablöste (rechts).

Quelle: Eigene Darstellung, Technische Universität Berlin

Als weiteres Beispiel sei DUT\_9 genannt. Hier war die Rückseitenabdeckung aus Kunststoff mittels Clips am Gerät befestigt. Die Festigkeit der Verbindung dieser Clips war jedoch wesentlich höher als bei DUT\_2 und kann ohne Werkzeug kaum gelöst werden. Bei einer zerstörungsfreien Demontage muss hier vorsichtig vorgegangen werden, um eine Beschädigung der Rückseitenabdeckung (Bruch eines der Kunststoffclips) zu vermeiden. Nach dem Öffnen der Rückseitenabdeckung mussten sechs Schrauben und zwei Steckverbinder gelöst werden. Anschließend konnte ein Teil des Innenrahmens gelöst und schließlich der Akku aus dem Gerät entfernt werden. Der Akku ist mit einem Klebstoff befestigt, der eine Entnahme deutlich erschwert. Dabei war die Schwierigkeit insbesondere, dass der Akku so in das Gerät eingelassen ist, dass kaum ein Angriffspunkt zum Hebeln mittels Werkzeug gegeben ist. Hier ist ein Risiko der Beschädigung des Akkus bei der Entnahme gegeben.

Abbildung 37: Entnahme eines integrierten Akkus anhand DUT\_9



Die Separierung der Rückseitenabdeckung erforderte den Einsatz eines hebelnden Werkzeugs (links). Die Entnahme des Akkus erforderte ein ebensolches Werkzeug (rechts). Hier erschwerte insbesondere die Kombination aus biegsamer Pouchzelle, Einsatz von Klebstoff sowie metallischem Innenrahmen um die Akkuzelle herum die Entnahme.

Quelle: Eigene Darstellung, Technische Universität Berlin

Bei DUT\_1 musste zunächst die Rückseitenabdeckung gelöst werden. Diese war fest mit dem dahinterliegenden Innenrahmen verklebt, so dass Wärmeenergie aufgewendet werden musste, um sie vom Rahmen abzulösen. Das Lösen vom Rahmen nach der Erwärmung selbst erforderte den Einsatz von Spezialwerkzeug (Plektren und Haken oder Saugnapf) um einen Hebel in die geringen Spaltmaße einbringen zu können (Abbildung 38). In einer zerstörungsfreien Demontage kam erschwerend hinzu, dass die Oberfläche der Rückseitenabdeckung von DUT\_1 aus Glas besteht, welches bei einer Deformation beim Hebeln leicht beschädigt werden kann. Anschließend wurde eine Schraubverbindung gelöst, um den Innenrahmen vom Displaymodul separieren zu können. Der anschließend freiliegende Akkumulator selbst ist fest mit dem Displaymodul verklebt und die Entnahme konnte nur unter Krafteinwirkung bzw. mit schabendem Werkzeug erfolgen. Durch die feste Verklebung von Akku und Display wurde bei der Demontage das Display irreparabel beschädigt (Bruch vom Displayglas und LCD).

Es kann vermutet werden, dass der Einsatz von stark adhäsivem Klebstoff zur Befestigung der Rückseitenabdeckung am Gerät dem Erreichen einer IP68 Zertifizierung dient. Der Einsatz eines ebenfalls stark adhäsiven Klebstoffs zur Befestigung des Akkus an der Rückseite des Displaymoduls ist durch diese Annahme jedoch nicht zu erklären.

Abbildung 38: Entnahme eines integrierten Akkus anhand DUT\_1



Die aus Glas bestehende Rückseitenabdeckung von DUT\_6 musste nach Erhitzen des Klebstoffes vorsichtig vom Gerät gelöst werden (oben links) und konnte anschließend separiert werden (oben rechts). Nach dem Lösen einer Schraubverbindung konnte der Innenrahmen von der Displayeinheit gelöst werden (unten links). Der Akku war mittels doppelseitigen Klebebands an der Rückseite der Displayeinheit montiert und musste mit einem Werkzeug vorsichtig angehoben werden, ehe er entnommen werden konnte (unten rechts).

Quelle: Eigene Darstellung, Technische Universität Berlin

Es wurde beobachtet, dass die untersuchten Geräte bezüglich des internen Aufbaus in zwei Kategorien fallen: schmale Akkus, die seitlich Platz für ein schmales Mainboard lassen (DUT\_1, 2, 3, 5, 6, 7, 8) sowie breite Akkus, welche die Breite des Gerätes weitestgehend ausfüllen (DUT\_4, 9). Im letzten Fall liegt i.d.R. ein Mainboard oberhalb des Akkus, dass mittels Flachbandkabel mit einer Tochterkarte unter dem Akku verbunden ist (Abbildung 39).

Abbildung 39: Beispiele für die zwei grundlegenden Typen des internen Smartphone Designs



Prinzipiell lässt sich die interne Konstruktion der untersuchten Smartphones in zwei Typen unterteilen: Ein schmaler Akku an einer Geräteseite und ein darum herum konstruiertes Mainboard (links und Mitte) oder ein breiter Akku im mittleren Segment des Gerätes, mit einem darüber liegenden Mainboard, dass mittels Flachbandkabel mit einem Daughterboard verbunden ist (rechts).

Quelle: Eigene Darstellung, Technische Universität Berlin

### Entnahme des Displays

Eine manuelle Entnahme der Displayeinheit ist bei Smartphones in der Regel nicht vorgesehen. Allein bei DUT\_5 war die Displayentnahme ohne den Einsatz von Werkzeug durchführbar. Nach dem manuellen Abnehmen der Rückseitenabdeckung konnte das Displaymodul nach dem Lösen von 2 Riegeln abgenommen werden (Abbildung 40).

Abbildung 40: Entnahme eines Smartphone Displays anhand DUT\_5





Bei DUT\_5 kann die Rückseitenabdeckung ohne Werkzeug vom Gerät separiert werden (oben). Das Display kann nach dem Lösen von zwei Riegeln (in blau) vom Gerät separiert werden (Werkzeug ist auf dem Foto abgebildet, wurde aber nicht für die Demontage selbst benötigt).

Quelle: Eigene Darstellung, Technische Universität Berlin

DUT\_7 war das einzige Gerät der Stichprobe, bei dem die Displayeinheit als erste Baugruppe im Zuge der Demontage vom Gerät separiert wird. Dazu wurden zunächst, analog zu DUT\_6, zwei Schrauben am Gehäuse gelöst. Prinzipiell konnte das Display anschließend angehoben werden, wozu jedoch wegen geringer Spaltmaße ein Werkzeug eingesetzt werden musste (bspw. Saugnapf). Zur Separierung der Displayeinheit im Zuge der zerstörungsfreien Demontage mussten im Geräteinneren fünf Schrauben drei verschiedener Typen und vier Verbindungskabel gelöst werden.

Abbildung 41: Entnahme eines Smartphone Displays anhand DUT\_7



Bei DUT\_7 ist die Displayeinheit die erste Komponente, die im Zuge der Gerätedemontage separiert wird. Hierzu wurden zunächst zwei Schrauben gelöst. Anschließend ließ sich das Display anheben, war jedoch am oberen Ende des Geräts noch verbunden. Zur Separierung mussten fünf Schrauben und vier Verbindungskabel gelöst werden.

Quelle: Eigene Darstellung, Technische Universität Berlin

In allen anderen Fällen wird zunächst die Rückseitenabdeckung zuerst vom Gerät separiert. Die Anzahl und Art der auszuführenden Arbeitsschritte, bis das Displaymodul entnommen werden kann, variiert zwischen den Geräten.

### Entnahme der Leiterplatten

Analog zu Notebooks sind die Leiterplatten von Smartphones integrale funktionelle Komponenten und dementsprechend mit allen weiteren elektronischen Baugruppen verbunden. Weiterhin waren die Leiterplatten der Smartphones der untersuchten Stichprobe in allen Fällen mit mehreren Schrauben im Gerät montiert. Eine Entnahme setzt damit immer das Öffnen des Gerätes und das Lösen von etlichen

Verbindungen und Kabelverbindungen voraus. Eine einfache Entnahme ist daher in der Regel nicht möglich.

Es wurde beobachtet, dass sich die Leiterplatten der untersuchten Geräte, analog zu den Bauformen der Akkus (vgl. Abbildung 39), in zwei Kategorien unterteilen lassen. Bei den Geräten DUT\_1, 2, 3, 5, 6, 7, 8 kommen schmale Leiterplatten zum Einsatz, die um einen schmalen Akku herum von der Oberseite des Gerätes (Kamera, Lautsprecher) bis zur Unterseite reichen (Mikrofon, USB Port, usw.). Das Mainboard ist i.d.R. nicht ein zusammenhängendes Bauteil, sondern zwei (oder mehr) separate Leiterplatten. Bei den Geräten DUT\_4 und DUT\_9 kommt ein im oberen Bereich der Geräte positioniertes, rechteckiges Mainboard zum Einsatz, das über Flachbandkabel mit einer Tochterkarte (Daughterboard) im unteren Bereich des Gerätes (Mikrofon, USB Port, usw.) verbunden ist. Im mittleren Segment dazwischen liegt ein breiter Akku.

### Smartphone Gehäuse

Smartphone Gehäuse bestehen aus mehreren Elementen. Das größte und am leichtesten separierbare Element ist die Rückseitenabdeckung. In der untersuchten Stichprobe bestanden sechs der Rückseitenabdeckungen aus Kunststoffen, zwei aus Kunststoff mit einer Oberfläche aus Glas und eins aus Metall (Aluminium, DUT\_7). Bei allen untersuchten Geräten musste zur Demontage zunächst die Rückseitenabdeckung separiert werden. Allein bei DUT\_7 wird zunächst die Displayeinheit separiert (vgl. Abbildung 41).

Die Rückseitenabdeckungen bestehen in allen untersuchten Fällen aus Verbänden von verschiedenen Materialien. Bei Rückseitenabdeckungen aus Kunststoff wird oftmals Polycarbonat eingesetzt. Dabei handelt es sich jedoch i.d.R. nicht um ein Monomaterial, wie in Abbildung 42 beispielhaft anhand DUT\_2 dargestellt. Die Glasfaserverstärkung des Basispolymers, in Kombination mit stoffschlüssig verbundenen Materialien wie Silikon oder einer Gummierung auf der Außenseite, sprechen für eine schlechte Recyclingfähigkeit. Teilweise konnte keine Kunststoffkennzeichnung identifiziert werden.

Abbildung 42: Beispielhafte Darstellung der werkstofflichen Zusammensetzung einer Smartphone Rückseitenabdeckung aus Kunststoff anhand DUT\_2



Die Rückseitenabdeckung besteht laut aufgebrachter Kennzeichnung aus Polycarbonat (PC) mit einer Verstärkung aus Glasfaser (GF) zu 10 Gewichtsprozent. Innenseitig ist eine Dichtung aus Silikon aufgebracht, die das Eindringen von Flüssigkeit in das Gerät verhindern soll. Weiterhin ist ein Laminat aus Folien aufgeklebt, die eine Kupferbeschichtung und eine nicht identifizierte Paste beinhalten, vermutlich zur Abführung von Wärme aus dem Gerät über das Gehäuse.

Quelle: Eigene Darstellung, Technische Universität Berlin

Es wurde festgestellt, dass bei den Geräten mit Kunststoffgehäuse ein Innenrahmen aus Magnesium oder einer Magnesiumlegierung vorliegt, der zur Stabilität und Steifigkeit des Gerätes beiträgt. Die elektronischen Baugruppen (Leiterplatten, Akkumulator) sind an den Innenrahmen montiert. Bei Geräten mit einem Metallgehäuse kommt ein solcher Innenrahmen nicht zwangsläufig zum Einsatz und die Komponenten sind an der Gehäuserückseite montiert.

### **3.5.6 Ergänzende Erkenntnisse**

#### **Weitere Erkenntnisse zu Smartphone-Akkumulatoren**

Hersteller von Smartphones aus dem Begleitkreis machten die Angabe, dass Akkumulatoren aus mehreren Gründen in Geräten integriert werden. Diese decken sich weitestgehend mit den zu Notebook-Akkumulatoren genannten Gründen (Kapitel 3.4.6) jedoch wird zusätzlich der Akkumulator als stabilisierendes Element genannt, das einen großen Teil des Volumens im Gerät einnimmt. Als vorrangige Begründung wird jedoch der Schutz vor dem Eindringen von Flüssigkeiten und Staub als ein relevanter Faktor für die Langlebigkeit der Geräte sowie Sicherheitsbedenken durch Ersatzakkus von Drittanbietern genannt.

Es wurde mittels der Demontageversuche belegt, dass eine IP67 Zertifizierung auch erreicht werden kann, wenn der Akkumulator manuell entnehmbar ist. In Marktrecherchen konnte ebenfalls ein nach IP68 zertifiziertes Smartphone eines marktführenden Herstellers mit entnehmbarem Akkumulator identifiziert werden. Hersteller im Begleitkreis gaben an, dass eine IP68 Zertifizierung insbesondere Fragestellungen um die Herstellergarantie bei Wasserschäden vereinfacht (insbesondere Dauer und Tiefe des Eintauchens). Ein marktführender Hersteller gab an, dass seit dem Verkleben der Gerätegehäuse die Ausfallrate durch Wasserschäden drastisch abgenommen hat.

Ende 2017 kam das erste Smartphone mit einem Akkumulator auf den Markt, der aus zwei Zellen anstatt einer Zelle besteht. Die Zellen werden dabei lose durch Kunststoffteile bzw. Kunststofffolie zusammengehalten. Beide Zellen sind mittels Klebstoff im Gehäuse befestigt. Nach Einschätzung der Autoren ist die Wahrscheinlichkeit relativ hoch, dass weitere Hersteller und Modelle mit mehrzelligen Akkumulatoren folgen werden.

#### **Weitere Erkenntnisse zur Ökobilanz von Smartphones**

Eine ökobilanzielle Bewertung eines modularen Smartphones (Proske et al. 2016) zeigte auf, dass die Modularität des Gerätes zunächst zusätzliche Umweltlasten in Höhe von ca. 10 Prozent im Vergleich zu einem gewöhnlichen, nicht-modularen Gerät erzeugt. Diese zusätzliche Umweltlast wird mehrheitlich durch zusätzlich benötigte Kontakte, Modulgehäuse und Leiterplattenfläche erzeugt. Sie wird jedoch deutlich kompensiert, wenn die Modularität zu besserer Reparierbarkeit und dadurch verlängerter Nutzungsdauer führt. Der CO<sub>2</sub>-Fußabdruck des Gerätes über den Lebensweg kann bei einer Verlängerung der Produktlebensdauer von drei auf fünf Jahre um rund 30 Prozent je Nutzungsjahr gesenkt werden. Ein vergleichbar hohes Einsparpotential bieten andere Ökodesign-Strategien nicht.

#### **Weitere Erkenntnisse zu Aspekten der Obsoleszenz von Smartphones**

Durch die nach wie vor im Verhältnis zu anderen Produktgruppen zügig voranschreitende technische Weiterentwicklung von Hardware- und Softwarekomponenten in Smartphones, treten, neben dem unvermeidbaren Kapazitätsverlust der Akkumulatoren, weitere Faktoren in den Vordergrund. Häufig genannte Aspekte sind beispielsweise:

- ▶ Software Obsoleszenz: Smartphones werden nur für eine geringe Zeitspanne mit Updates seitens der Hersteller versorgt (oftmals 2 Jahre Updates des Betriebssystems und ein weiteres Jahr Sicherheitsupdates). Anschließend kann der technisch durchschnittlich versierte Nutzer keine Updates mehr installieren. Weiterhin steigen die Anforderungen der Softwareanwendungen (Apps) an die Hardware stetig an, so dass ältere Geräte nicht mehr die entsprechende Leistung erbringen können.
- ▶ Hardware Obsoleszenz: Komponenten wie bspw. die Kamera unterliegen stetigen Innovationsprozessen. Bestimmte Apps benötigen neueste Hardwarespezifikationen, wie Nahfeldkommunikation (Near Field Communication, NFC), um auf Geräten genutzt werden zu können.
- ▶ Weitere Faktoren der Obsoleszenz spielen ebenfalls eine Rolle (bspw. psychologische Obsoleszenz), werden aber an dieser Stelle nicht weiter vertieft.

### Erkenntnisse zur Häufigkeit von Beschädigungen in der Nutzungsphase

In der Nutzungsphase von Smartphones ist die am häufigsten von Beschädigungen betroffene Komponente das Display. Laut einer Statistik der Reparaturanfragen eines deutschen Reparaturbetriebes (handyreparatur123) führen Displayschäden mit 52 Prozent Anteil an Reparaturanfragen die Statistik an, gefolgt von Softwarefehlern (10 Prozent). Auf Wasserschäden entfallen 8 Prozent der Reparaturanfragen und auf Akkumulatoren 6 Prozent.

Es ist nachvollziehbar, dass das Display, als eine aus Glas gefertigte Komponente, in einem mobilen Gerät und den Smartphone-typischen Nutzungsmustern, die am häufigsten von Schäden betroffene Komponente ist. Es ist am Markt ebenfalls bei Rückseitenabdeckungen ein Trend zum vermehrten Einsatz von Glas erkennbar, getrieben vom Trend hin zum induktiven (kabellosen) Laden der Batterie sowie dem Trend weg von Kunststoff hin zu hochwertigeren Materialien. Es wird angenommen, dass dieser Trend zu häufigeren Beschädigungen der Rückseitenabdeckungen in den kommenden Jahren führen wird.

Bei der Demontage marktaktueller Geräte im Rahmen weiterer Forschungsprojekte (unveröffentlichte Daten) wurde festgestellt, dass teilweise stark adhäsive Klebstoffe zur Befestigung des Akkumulators im Smartphone eingesetzt werden. Teilweise ist eine Separierung von der Displayeinheit oder dem Innenrahmen trotz der Einwirkung von Wärme und mechanischer Kraft nicht durchführbar. Dies erhöht die Gefahr einer Beschädigung des Akkumulators deutlich. Dieser Umstand verdeutlicht aber ebenso, dass die eine Bewertung zur Verwendung von Klebstoffen aus Sicht der Ressourceneffizienz nicht pauschal möglich ist. Teilweise ließen sich Klebstoffe ohne übermäßigen Krafteinsatz lösen, in anderen Fällen war Wärmeenergie und deutlich mehr Kraft zum Lösen von Klebverbindungen erforderlich.

#### 3.5.7 Zusammenfassung

Beim potentiellen Altgeräteaufkommen von Smartphones wird mit einem stark steigenden Trend bis 2020 und etwa gleichbleibenden hohen Altgeräteaufkommen im Jahr 2025 gerechnet. Welcher Anteil dieser Altgeräte tatsächlich bei Erstbehandlungsanlagen in Deutschland ankommt, kann im Rahmen dieser Studie nicht prognostiziert werden. Für den Smartphoneabsatz in Deutschland werden über den Zeitraum von 2015 bis 2025 leicht abnehmende Zahlen prognostiziert.

Neben den Edelmetallen sind im potentiellen Abfallaufkommen von Smartphones speziell Kobalt und Neodym in recyclingrelevanten Mengen verbaut. Kunststoffe stehen wegen vergleichsweise geringer Mengen und schlechten Voraussetzungen zum stofflichen Recycling weniger im Fokus.

Unter den untersuchten Geräten waren drei mit manuell entnehmbarem Akku und sechs mit integriertem Akku. Bei manuell entnehmbaren Akkus ist der Aufwand gering und der Vorgang kann in Sekunden durchgeführt werden. Bei Geräten mit integrierten Akkus schwankt der benötigte Aufwand und damit der notwendige Zeiteinsatz erheblich.

Zur Entnahme jeglicher Komponenten muss zunächst das Gehäuse geöffnet werden. Dies erfolgt je nach Designkonzept entweder durch die Separierung des Displays oder durch das Ablösen der Rückseitenabdeckung. Die Separierung des Displays als erster Schritt in der Demontage vereinfacht insbesondere Reparaturvorhaben, erschwert aber potentiell den Austausch des Akkumulators, da das Display relativ leicht versehentlich beschädigt werden kann (Glasbruch). Die Separierung der Rückseitenabdeckung erfolgt über das Lösen von Schraubverbindungen, Clips, oder von Klebverbindungen. Schrauben sind i.d.R. einfach lösbar, teilweise werden jedoch Schrauben mit proprietären oder seltenen Köpfen eingesetzt. Teilweise werden Schrauben eingesetzt, deren Material so weich ist, dass sie nach einem Schraubvorgang nicht mehr genutzt werden können. Clips sind teilweise leicht manuell lösbar (z.B. DUT\_2) und teilweise nur schwer mit Werkzeug lösbar (DUT\_9). Einige Klebstoffe lassen sich nach geringer Wärmezufuhr lösen, andere benötigen erheblich höhere Wärmezufuhr. Eine generalisierte Bewertung der Verbindungstechniken konnte in diesem Vorhaben daher nicht vorgenommen werden.

Anhand DUT\_2 kann belegt werden, dass eine IP67 Zertifizierung und ein wechselbarer Akku keinen Gegensatz darstellen. Dass die Entnahme eines integrierten und mit Klebstoff im Gerät befestigten Akkus ebenfalls in einer kurzen Zeitspanne erfolgen kann, zeigt das Beispiel DUT\_6. Die Entnahme des Akkus erfolgt über eine dafür vorgesehene Lasche.

Trotz der verschiedenen Produktkonzepte, die auch integrierte Akkus relativ leicht aus Smartphones entnehmbar machen, kann gerade die Vielfalt der verschiedenen Lösungen ein Problem für die Entnahme im Recycling bedeuten.

Der in Kapitel 3.5.6 erwähnte Schutz vor dem Eindringen von Fremdkörpern und Flüssigkeiten ist aus Sicht der Langlebigkeit ein bedeutender Faktor, der möglicherweise im Widerspruch zu Designentscheidungen steht, die eine einfache Demontage ermöglichen. So ist abzuwägen, welcher Aspekt prioritär behandelt werden soll. In den Maßgaben der Abfallhierarchie des Kreislaufwirtschaftsgesetzes steht die Vermeidung vor der Vorbereitung zur Wiederverwendung und vor dem Recycling. Das Marktanalyseunternehmen IDC schätzt, dass täglich fast 900.000 Smartphones weltweit durch Flüssigkeiten beschädigt werden. Nach Beschädigungen des Displays ist die Beschädigung durch Flüssigkeiten demnach die zweithäufigste Ursache (Francisco Jeronimo 2016).

Hersteller können verschiedenen Strategien folgen, um unterschiedlichen Aspekten der Kreislaufwirtschaft zu begegnen: Robustheit (implizit: Langlebigkeit) oder Modularität (implizit: Reparierbarkeit, Demontagefähigkeit). Eine Studie zur Recyclingfähigkeit eines modularen Smartphones (van Schaik und Reuter 2017) zeigte jedoch auch auf, dass die Separierung und getrennte Behandlung von vier Komponenten die besten Resultate bzgl. werkstofflichen Recyclings ergeben: Akkumulator, Displayeinheit (ins Leichtmetallrecycling zur Rückgewinnung von Magnesium), Rückseitenabdeckung, und Elektronik (Leiterplatten und Rest).

## 3.6 Fallstudie 3: Flachbildschirmfernseher

### 3.6.1 Marktdaten und Altgeräteaufkommen

In Tabelle 14 sind der deutschlandweite und europaweite Absatz von Flachbildschirmfernsehern für das Jahr 2015, sowie die Absatzprognosen für die Jahre 2020 und 2025 angegeben. So wurden im Jahr 2015 in Deutschland rund 8,4 Millionen Flachbildschirmfernseher abgesetzt. Für die Jahre 2020 und 2025 wird ein Anstieg der Absatzzahlen in Deutschland prognostiziert. Im Jahr 2020 wird mit einem Absatz von rund 9 Millionen Flachbildschirmfernsehern, 2025 mit einem Absatz von 9,1 Millionen Einheiten gerechnet. Für den europaweiten Absatz von Flachbildschirmfernsehern wird mit einem Rückgang der verkauften Einheiten gerechnet. Im Jahr 2015 lag der europaweite Absatz bei rund 44 Millionen verkauften Einheiten und wird bis 2020 voraussichtlich auf rund 39 Millionen verkaufte Einheiten zurückgehen (Statista 2017). Die in Deutschland abgesetzten Einheiten repräsentieren im Jahr 2015

entsprechend rund 19 Prozent des europaweiten Absatzes von Flachbildschirmfernsehern. Dieser Anteil steigt laut den Prognosen auf rund 23 Prozent an. Mit der Modellrechnung von Stobbe et al. (2015) und den in Tabelle 6 definierten Verweildauern wird das potentielle Altgeräteaufkommen für Flachbildschirmfernseher in Deutschland abgeschätzt. Demnach wurden 2015 rund 2,6 Millionen Flachbildschirmfernseher in deutschen Haushalten nicht mehr verwendet und standen potentiell dem Recycling zur Verfügung. Im Jahr 2020 wird sich diese Zahl voraussichtlich auf rund 6,4 Millionen Geräte erhöhen und bis zum Jahr 2025 auf rund 8,5 Millionen Geräte anwachsen.

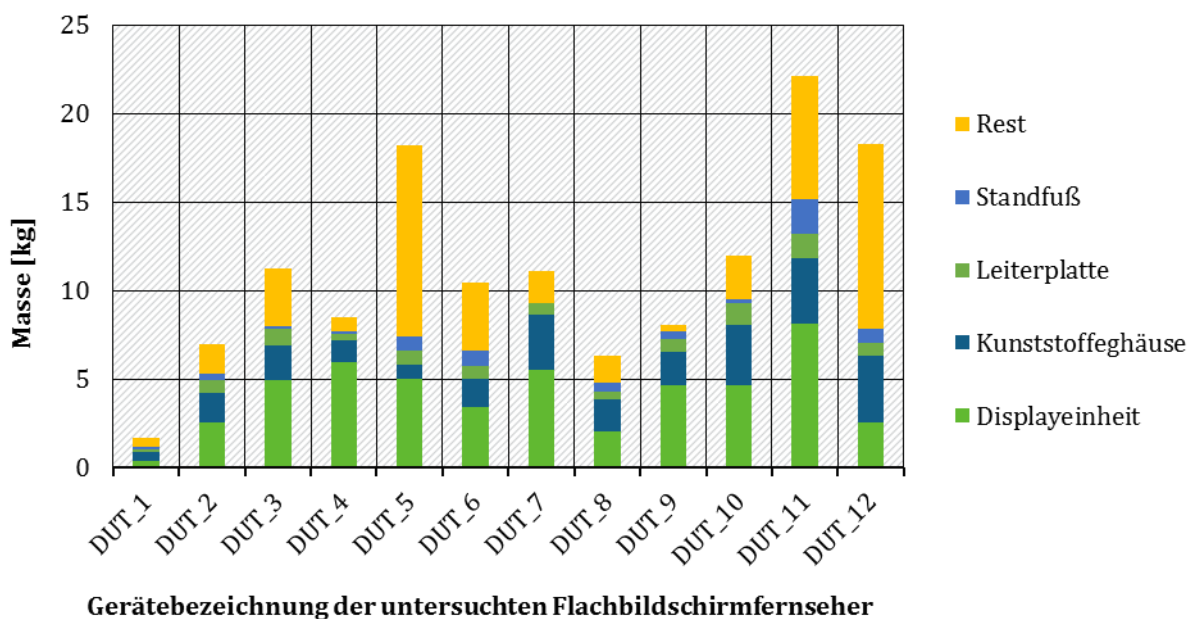
Tabelle 14: Flachbildschirmfernseher: Absatz und potentielles Altgeräteaufkommen

	2015 [Mio. Stk.]	2020 [Mio. Stk.]	2025 [Mio. Stk.]
Absatz (EU) (Statista 2017)	44	39	-
Absatz (D) (Stobbe et al. 2015)	8,4	9,0	9,1
Potentielltes Altgeräteaufkommen (D)	2,6	6,4	8,5

### 3.6.2 Stoffliche Zusammensetzung und Recyclingpotential

Die stoffliche Zusammensetzung mit Fokus auf die für das Vorhaben relevanten Zielstoffe (Kapitel 3.1.1) wurde anhand von Daten aus den Demontageversuchen (Kapitel 3.6.5) sowie Angaben aus der Literatur ermittelt. Abbildung 43 zeigt die Zusammensetzung der demontierten Flachbildschirmfernseher nach den wesentlichen Komponenten. Es ist anzumerken, dass die Displayeinheit neben dem eigentlichen Bildschirm (Panel) oftmals weitere Elemente einschließt, beispielsweise strukturgebende Elemente aus Kunststoff und Metall, da die Tiefe der Demontage nicht immer einheitlich erfolgen konnte. Wenn die Separierung problemlos möglich war, entfällt der Masseanteil dieser Elemente in die Kategorie „Rest“. Falls eine Separierung nicht einfach möglich war, entfällt die Masse in die Kategorie „Displayeinheit“.

Abbildung 43: Massen der wesentlichen Komponenten der untersuchten Flachbildschirmfernseher

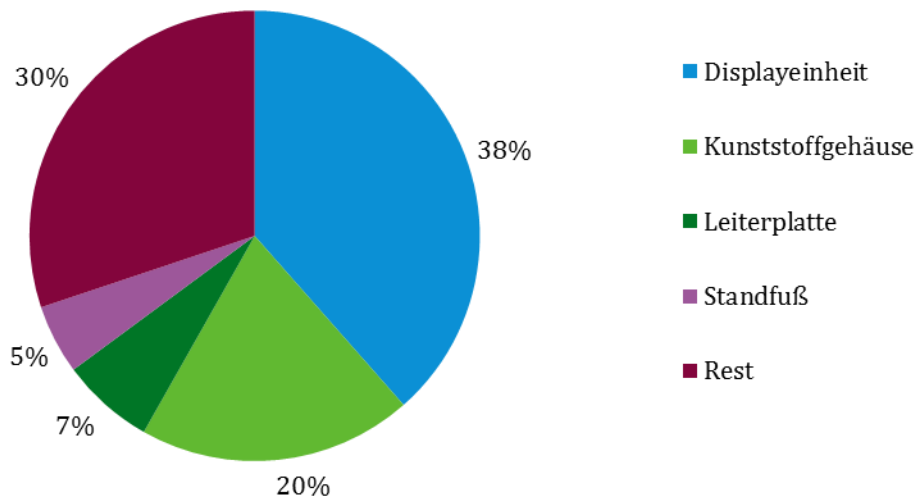


Quelle: Eigene Darstellung, Technische Universität Berlin

Abbildung 44 zeigt die auf Basis der demontierten Geräte ermittelte durchschnittliche Zusammensetzung der Flachbildschirmfernseher in der untersuchten Stichprobe. Die Gesamtmassen der in dieser

Studie betrachteten Flachbildschirmfernsehermodelle unterscheiden sich deutlich und liegen im Bereich von 1,6 kg (DUT\_1) bis 22 kg (DUT\_11). Im Durchschnitt liegen die untersuchten TVs bei rund 11 kg. Den größten Anteil der Gesamtmasse hatten bei 9 von 12 Modellen die Displayeinheit und bei 2 von 12 Modellen das Kunststoffgehäuse. Durchschnittlich machte die Displayeinheit bei den untersuchten Geräten rund 39 Prozent der Gesamtmasse aus, das Kunststoffgehäuse im Schnitt rund 20 Prozent. Die verbauten Leiterplatten beanspruchen durchschnittlich 7 Prozent des Gesamtgewichtes. Der Standfuß aus Kunststoff ist durchschnittlich für 5 Prozent der Gesamtmasse verantwortlich.

Abbildung 44: Durchschnittliche Massenanteile der wesentlichen Komponenten der untersuchten Flachbildschirmfernseher



Quelle: Eigene Darstellung, Technische Universität Berlin

In Tabelle 15 werden die potentiellen Massenströme der Zielstoffe, resultierend aus dem potentiellen Altgeräteaufkommen von Flachbildschirmfernsehern, in den Jahren 2015, 2020 und 2025 hochgerechnet und den Komponenten mit den größten Zielstoffanteilen zugeordnet. Zur Hochrechnung der Stoffmengen wurden eigene Untersuchungen ausgewertet und auf Daten aus vorherigen Veröffentlichungen zurückgegriffen. Dazu wird angemerkt, dass es nur um eine grobe Abschätzung der potentiell im Altgeräteaufkommen enthaltenen Stoffmengen geht. Ziel dabei ist, anhand der hochgerechneten Größenordnungen die Relevanz von möglichen Ökodesign-Anforderungen einschätzen zu können. Auch lässt die Darstellung Vergleiche der Größenordnung der Stoffmengen zwischen den Fallstudien zu. So kann abgewogen werden, für welche der Fallstudien welche Stoffe vorrangig adressiert werden sollten. Diesem Ziel einer Grobabschätzung entsprechend wurde keine vertiefte Recherche und Auswertung von verfügbaren Daten aus wissenschaftlicher Literatur vorgenommen.

Die in dieser Arbeit fokussierten Edelmetalle sind überwiegend in den Leiterplatten der Flachbildschirmfernseher enthalten. Kupfer hat unter den betrachteten Edelmetallen den größten Anteil am potentiellen Altgeräteaufkommen. Im Jahr 2015 wird die Kupfermenge in den potentiell dem Recycling zur Verfügung stehenden Flachbildschirmfernsehern auf rund 357 Tonnen taxiert. Dieser Anteil steigt bis zum Jahr 2020 bzw. 2025 voraussichtlich auf rund 878 bzw. 1166 Tonnen an. Über 90 Prozent des Kupferanteils können dabei den Leiterplatten (PCB) zugeordnet werden. Die Menge an Gold und Palladium am Altgeräteaufkommen von Flachbildschirmfernsehern wird im Jahr 2015 auf rund 0,4 Tonnen geschätzt und erhöht sich bis ins Jahr 2020 und 2025 voraussichtlich auf rund 0,9 Tonnen bzw. 1,2 Tonnen. Silber war 2015 mit rund 2,1 Tonnen im Altgeräteaufkommen enthalten. Der Silberanteil wird sich voraussichtlich bis zum Jahr 2020 bzw. 2025 auf rund 5,1 Tonnen bzw. 6,8 Tonnen erhöhen.

Bei den Sondermetallen stellt Tantal den größten Massenstrom dar, der mit überwiegendem Anteil den Leiterplatten zugeordnet wird. Im Jahr 2015 waren rund 11 Tonnen Tantal in den potentiell dem Recycling zur Verfügung stehenden Flachbildschirmfernsehern verbaut. Dieser Anteil erhöht sich im Jahr 2020 bzw. 2025 voraussichtlich auf rund 27 Tonnen bzw. 36 Tonnen. Indium stellt den zweitgrößten potentiellen Massenstrom der Sondermetalle dar und wird mit nahezu 100 prozentigem Anteil in der Displayeinheit der Fernseher verbaut. Im Jahr 2015 wurden potentiell 1,7 Tonnen Indium dem Recyclingprozess aus Flachbildschirmfernsehern zugeführt. Im Jahre 2020 und 2025 erhöht sich dieser potentielle Massenstrom auf rund 4,1 Tonnen bzw. 5,5 Tonnen. Die anderen Zielstoffe konnten nicht in recyclingrelevanten Größenordnungen ermittelt werden.

Die Kunststoffe machen den mit Abstand größten Massenanteil der betrachteten Zielstoffe am potentiellen Altgeräteaufkommen bei Flachbildschirmfernsehern aus. Insgesamt wurden drei verschiedene Polymere bzw. Polymerblends in nennenswerter Menge in den untersuchten Geräten identifiziert. Der Polymerblend PC-ABS und das Polymer Polystyrol, als Styrol-Butadien-Copolymer „High Impact Polystyrol“ (HIPS), stellen die größten Stoffmengen dar. So kann der Massenstrom von PC-ABS im Jahre 2015 mit rund 3.186 Tonnen beziffert werden. Dieser Massenstrom steigt in den Jahren 2020 bzw. 2025 auf 7.843 bzw. 10.416 Tonnen an. Polystyrol wird in ähnlicher Größenordnung für die Gehäuse von Flachbildschirmfernsehern eingesetzt. Im Jahr 2015 waren potentiell rund 1.882 Tonnen HIPS im potentiellen Abfallaufkommen von Flachbildschirmfernsehern verbaut. Dieser Anteil steigt voraussichtlich in den Jahren 2020 und 2025 auf 4.633 Tonnen bzw. 6.153 Tonnen an. Auch Polycarbonat (PC) wird häufig als Werkstoff für Gehäuse von Flachbildschirmfernsehern eingesetzt. Im Jahre 2015 betrug die potentielle Stoffmenge Polycarbonat in Flachbildschirmfernsehern rund 470 Tonnen und steigert sich voraussichtlich in den Jahren 2020 und 2025 auf 1.156 Tonnen bzw. 1.535 Tonnen.

Tabelle 15: Potentielle Stoffmengen der Zielstoffe aus Alt-Flachbildschirmfernsehern in den Jahren 2015, 2020 und 2025; Komponenten mit dem größten Massenanteil des Zielstoffes

Stoff-kategorie	Zielstoff	Stoffmenge [t]			Komponente*	Datenquelle
		2015	2020	2025		
Edelmetall	Gold	0,4	0,9	1,2	PCB	(Chancerel und Marwede 2016)
	Silber	2,1	5,1	6,8	PCB	(Chancerel und Marwede 2016)
	Kupfer	357	878	1.166	PCB	(Chancerel und Marwede 2016)
	Palladium	0,4	0,9	1,2	PCB	(Chancerel und Marwede 2016)
Sondermetall	Kobalt	0,1	0,2	0,3	PCB	(Blaser et al. 2011)
	Neodym					
	Tantal	11	27	36	PCB	(Chancerel und Marwede 2016)
	Gallium	<0,1	<0,1	<0,1	PCB	(Chancerel und Marwede 2016)
	Indium	1,7	4,1	5,5	Display	(Böni et al. 2015)
	PC-ABS	3.186	7.843	10.416	Gehäuse	Eigene Messung
	PC	470	1.156	1.535	Gehäuse	Eigene Messung
	HIPS	1.882	4.633	6.153	Gehäuse	Eigene Messung

Stoff- kategorie	Zielstoff	Stoffmenge [t]			Komponente*	Datenquelle
		2015	2020	2025		
	PMMA	2.863	7.048	9.361	Display	Eigene Messung

\*Es werden nur die ein bis zwei Komponenten mit dem deutlich höchsten Anteil eines Zielstoffes angegeben

### 3.6.3 Angenommenes Recyclingszenario

Die im Folgenden beschriebenen Annahmen beruhen auf Informationen aus dem Begleitkreis sowie ergänzenden Literaturrecherchen. Es wird das nach aktuellem Erkenntnisstand in Deutschland typische Recyclingszenario beschrieben. Die Beschreibung ist als spezifizierende Ergänzung zur allgemeinen Beschreibung der Behandlung und dem Recycling von EAG zu betrachten (Kapitel 3.2.3 ff). Das tatsächliche Verfahren mit den Altgeräten in der Praxis unterscheidet sich je nach Behandlungsanlage, deren Abnehmern, als auch Fluktuationen im Preis der produzierten Stoffströme, um nur einige der Einflussfaktoren zu benennen. Es besteht daher kein Anspruch auf Allgemeingültigkeit.

Nach aktuellem Stand gelangen noch erhebliche Stückzahlen von Flachbildschirmfernsehern mit CCFL (Cold Cathode Fluorescent Lamp, fluoreszierende Kaltkathodenröhren) Hintergrundbeleuchtungen in die Erstbehandlung. Die quecksilberhaltigen Röhren müssen separat vom Rest des Gerätes behandelt werden. Aufgrund der toxischen Wirkung von Quecksilber wird dies häufig in geschlossenen Anlagen mit entsprechendem Abzug gehandhabt. Teilweise existieren teilautomatisierte Lösungen zur Öffnung der Geräte (vgl. Kapitel 3.3.1). Teilweise werden die Displaypanels anschließend separiert, der Rest des Gerätes gelangt in die mechanische Grobzerkleinerung und die bei der automatisierten Sortierung entstehenden Fraktionen.

### 3.6.4 Bestehende Anforderungen

Im Folgenden werden Anforderungen aus gesetzlichen sowie freiwilligen produktpolitischen Instrumenten aus verschiedenen Quellen zusammengefasst. Dabei werden ausschließlich Kriterien mit einer Relevanz für die Kreislaufführbarkeit von Werkstoffen einbezogen.

#### Gesetzliche Anforderungen

Die Maßgaben aus dem ElektroG sind in Kapitel 3.2.1 und Kapitel 3.2.3 zusammengefasst. Darüberhinausgehende Anforderungen an Flachbildschirmfernseher sind im ElektroG nicht enthalten.

Die Ökodesign-Durchführungsmaßnahme für Fernseher wurde als Verordnung (EG) 642/2009 am 23.07.2009 im Amtsblatt der EU veröffentlicht. Darin werden keine die Materialeffizienz der Geräte betreffenden Anforderungen gestellt. Ein Entwurf für die Überarbeitung der Anforderungen enthält in Anhang III folgende Anforderungen an die Materialeffizienz<sup>13</sup>:

- ▶ Löten und Kleben, mit der Ausnahme von doppelseitigem Klebeband, sollen bei bestimmten Komponenten (u.a. Batterien, Leiterplatten, Displaypanels, PMMA Boards, interne Netzteile) nicht als Verbindungstechnik eingesetzt werden dürfen
- ▶ Für den Zugriff auf die oben genannten Komponenten sollen die benötigten Arbeitsschritte dokumentiert werden, einschließlich Angaben zu Typ und Anzahl der zu lösenden Verbindungstechniken sowie der benötigten Werkzeuge
- ▶ Kunststoffteile ab einer Masse über 50 Gramm (mit bestimmten Ausnahmen, wie z.B. Leiterplatten, PMMA Boards, Verpackungen und Kabel) sollen mittels Kunststofftypenkennzeichnung gekennzeichnet werden, einschließlich der Angabe über den Einsatz von Flammschutzmitteln

<sup>13</sup> [https://ec.europa.eu/info/law/better-regulation/initiatives/ares-2016-7108187\\_en](https://ec.europa.eu/info/law/better-regulation/initiatives/ares-2016-7108187_en)

- ▶ Logos sollen über den Einsatz von Cadmium und Quecksilber informieren

Zum Zeitpunkt der Berichtsfassung war noch nicht klar, ob die Anforderungen in der beschriebenen Form in die Gesetzgebung eingehen werden.

### **Umweltzeichen**

Im Folgenden werden die in Kapitel 3.2.2 eingeführten Umweltzeichen hinsichtlich ihrer materialeffizienzbezogenen Designanforderungen für Flachbildschirmfernseher diskutiert. Im Mittelpunkt stehen die gestellten Anforderungen an die verwendeten Werkstoffe und die recyclinggerechte Konstruktion. In erster Linie werden die Anforderungen des Blauen Engel für Fernsehgeräte (RAL-UZ 145 2012) diskutiert und punktuell durch ergänzende und weiterführende Anforderungen der anderen untersuchten Umweltzeichen ergänzt.

### **Verwendete Werkstoffe**

Der Blaue Engel stellt nur wenige Anforderungen an die in Fernsehgeräten verwendeten Werkstoffe. Konkrete Anforderungen sind das Einschränken der Verwendung von giftigen, krebserregende und erbgutverändernden Stoffen, sowie die Materialkennzeichnung von Plastikteilen > 25 g nach ISO 11469 unter Beachtung von ISO 1043 Teil 1-4 formuliert. Beim Eco Mark Label sind für Plastikteile mit einer Masse > 25 g insgesamt maximal vier verschiedene Polymerwerkstoffe pro Gerät zulässig. Ein einzelnes Gehäuseelement darf nur aus einem einzigen Polymer bzw. Polymerblend bestehen. Auch für die Auszeichnung mit dem Eco Mark Label müssen Kunststoffteile > 25 g über die verwendeten Kunststoffe informieren. Optional fordert das Eco Mark Label, dass mindestens ein wiederverwendetes oder recyceltes Plastikteil verwendet wird. Das EPEAT Label geht einen ähnlichen Weg und fordert, ebenfalls optional, dass mindestens fünf bis 10 Prozent bzw. in einer weiteren Option 25 Prozent des verbauten Kunststoffes aus recyceltem Kunststoff besteht. Als obligatorische Anforderung für die Erlangung des EPEAT Labels besteht für Fernseher, analog zu den anderen drei untersuchten Produktgruppen, eine Pflicht zur Angabe des Anteils an PCR- und biobasierten Kunststoffen.

### **Recyclinggerechte Konstruktion**

Der Blaue Engel fordert für die recyclinggerechte Konstruktion, dass eine Separierung wertstoffhaltiger Bauteile und Materialien leicht und schnell möglich sein muss. Die Verbindungsstellen müssen leicht zugänglich sein und eine Demontage muss mit nicht näher definierten „herkömmlichen“ Werkzeugen möglich sein. Ähnliche Anforderungen stellen ebenfalls das European Ecolabel, das Nordic Ecolabel und das EPEAT Label. Beim japanischen Eco Mark Label werden deutlich differenziertere obligatorische als auch optionale Anforderungen gestellt. So muss das Design eines Fernsehgerätes unter Berücksichtigung einer Reduktion der eingesetzten Schraubenzahl stattfinden. Ferner ist die Anzahl der verwendeten Schrauben zu dokumentieren. Die zu entfernenden Schrauben sind außerdem leicht zugänglich anzubringen und die Schraubenposition ist visuell auf dem Gerät zu kennzeichnen. Auch fordert das Eco Mark Label, dass die Zerlegung mit Universalwerkzeug durchgeführt werden kann. Des Weiteren werden die Hersteller zur Erlangung des Eco Mark Labels dazu verpflichtet, exemplarisch eine Demontage zu dokumentieren. Verbaute Batterien müssen gewechselt werden können ohne die gesamte Leiterplatte zu ersetzen.

### **3.6.5 Demontageversuche mit Flachbildschirm-TVs**

Für die durchgeführten Untersuchungen an Fernsehgeräten wurden 12 handelsübliche Modelle aus dem Jahr 2015 ausgewählt, die unterschiedliche Produktmerkmale aufwiesen, von elf unterschiedlichen Herstellern produziert wurden und signifikante Verkaufszahlen in der EU besaßen. Die Fernseher wurden zur Beantwortung der Forschungsfragen aus dem EU Horizont 2020 Projekt CloseWEEE (Dimitrova, o.J.) zur Verfügung gestellt.

Eine Beschreibung der Geräte ist in Tabelle 16 aufgeführt. Ausgewählt wurden zehn LCD-LED-Fernseher (LCD mit LED Hintergrundbeleuchtung), ein Plasma-Fernseher und ein OLED-Fernseher. Die Displaygrößen betragen 15,6 bis 55 Zoll in der Diagonale.

Tabelle 16: Beschreibung der untersuchten Flachbildschirmfernseher

Bezeichnung	Hersteller	Displaygröße [Zoll]	Displaytechnologie	Markteintritt	Preis bei Markteintritt [Euro]
DUT_1	Hersteller 1	15,6	LED-LCD	2014	150
DUT_2	Hersteller 2	32	LED-LCD	2014	500
DUT_3	Hersteller 3	32	LED-LCD	2014	Keine Daten
DUT_4	Hersteller 4	40	LED-LCD	2014	500
DUT_5	Hersteller 5	47	LED-LCD	2012	1300
DUT_6	Hersteller 6	39	LED-LCD	2014	Keine Daten
DUT_7	Hersteller 7	48	LED-LCD	2014	500
DUT_8	Hersteller 8	32	LED-LCD	2014	400
DUT_9	Hersteller 9	40	LED-LCD	2014	400
DUT_10	Hersteller 10	42	Plasma	2014	500
DUT_11	Hersteller 10	55	OLED	2013	9000
DUT_12	Hersteller 11	50	LED-LCD	2014	500

DUT = Device Under Test; LED-LCD = LCD Bildschirm mit LED Hintergrundbeleuchtung; Plasma = Plasmabildschirm; OLED: Bildschirm aus organischen Leuchtdioden

Es wird angemerkt, dass Flachbildschirmfernseher mit Plasmabildschirm mittlerweile durch Geräte mit LCD Bildschirm und auch durch OLED Bildschirme weitestgehend verdrängt wurden. DUT\_10 kann daher zwar als Rückblick dienen um Einblicke zu erhalten, welche Änderungen im Produktdesign mit dem Technologiewechsel von Plasmabildschirmen zu neueren Technologien einhergehen. Für die Ableitung von ökologischen Anforderungen kann DUT\_10 jedoch nur bedingt herangezogen werden. Demgegenüber wird die Bedeutung des OLED Fernsehers (DUT\_11) hervorgehoben. Dieser stellt eine der zukünftigen Technologien im Bereich der FBS-TVs dar. Es wird erwartet, dass der Marktanteil von Fernsehern mit OLED Panels zukünftig weiter zunehmen wird.

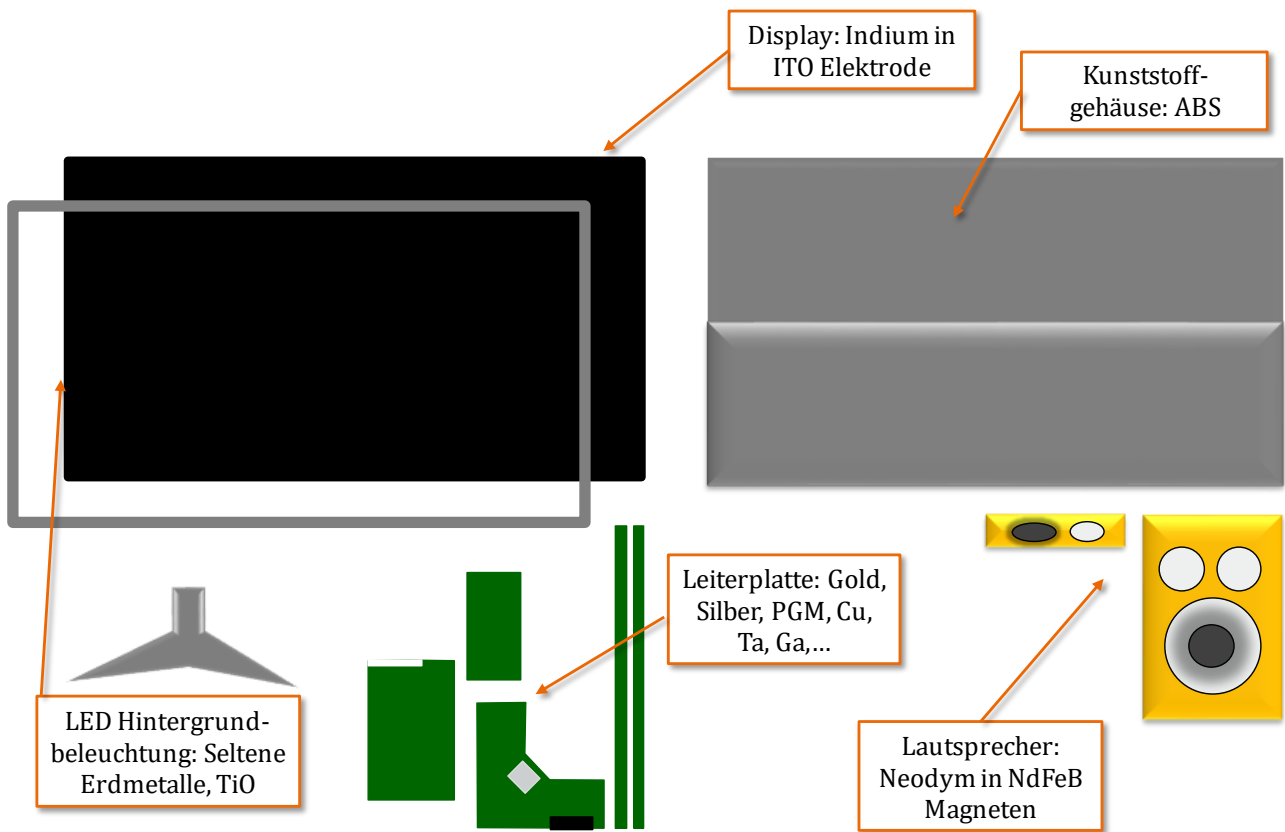
Wie in Kapitel 1.2 beschrieben, wurden die Demontagen möglichst zerstörungsfrei durchgeführt. Eine Behandlung der Geräte im Zuge der Erstbehandlung kann nur bedingt abgebildet werden. Dennoch erlauben die Demontagen detaillierte Erkenntnisse zu unterschiedlichen Designstrategien seitens der Hersteller sowie eine Abschätzung der Auswirkung auf die Kreislaufführbarkeit der enthaltenen Zielstoffe.

Die Auswahl der Zielkomponenten ergibt sich weitestgehend aus den in Abbildung 44 und in Tabelle 15 dargestellten Massenanteile der Komponenten am Gesamtgerät und der Komponenten mit dem dominierenden Anteil der jeweiligen Zielstoffe. Dementsprechend sind die Komponenten besonders relevant, die den größten Anteil mindestens einer der Zielstoffe beinhalten.

Zielkomponenten waren:

- ▶ Displayeinheit
- ▶ Leiterplatten
- ▶ Gehäuseteile

Abbildung 45: Beispielhafte Darstellung der Zielstoffe und Zuordnung zu TV Komponenten

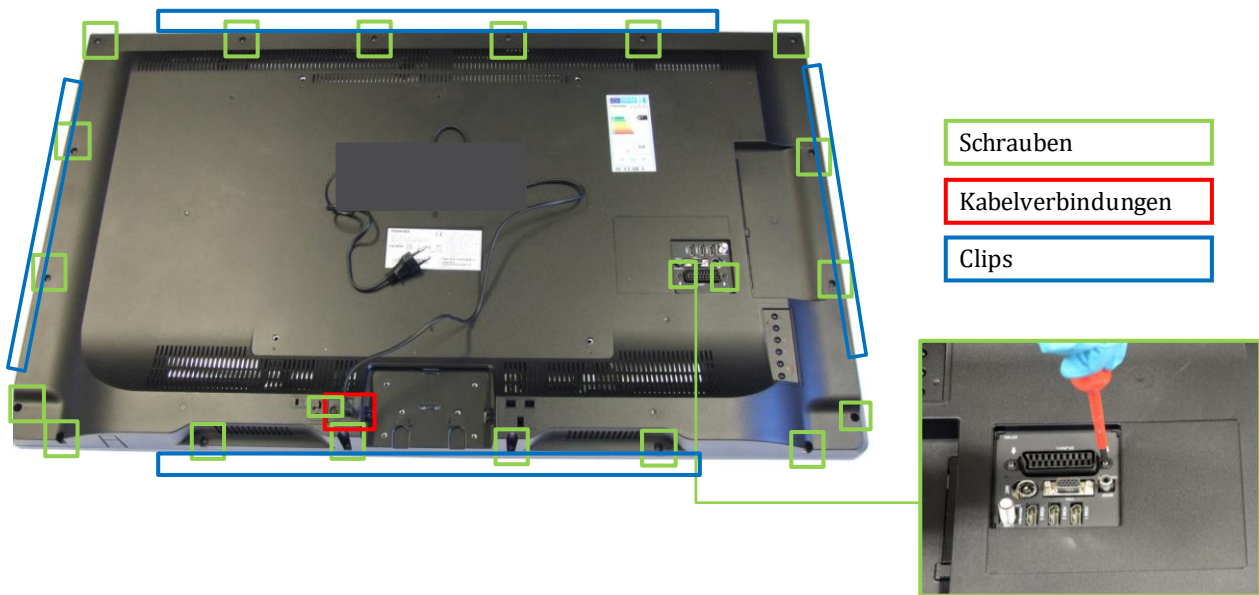


Quelle: Eigene Darstellung, Technische Universität Berlin

### Kunststoffgehäuse

Der erste Schritt in der manuellen Demontage war das Öffnen des Gehäuses. Dazu musste bei allen untersuchten Geräten zunächst die Rückseitenabdeckung separiert werden. Dies erfolgte in allen Fällen über das Lösen einer unterschiedlichen Anzahl von Schrauben (sieben bei DUT\_10 bis zu 27 bei DUT\_4) sowie das Lösen von Clips, wie beispielhaft in Abbildung 46 dargestellt. Anschließend konnte die Rückseitenabdeckung vom Gerät separiert werden.

Abbildung 46: Beispielhafte Darstellung der benötigten Arbeitsschritte zur Öffnung der Rückseitenabdeckung anhand DUT\_7

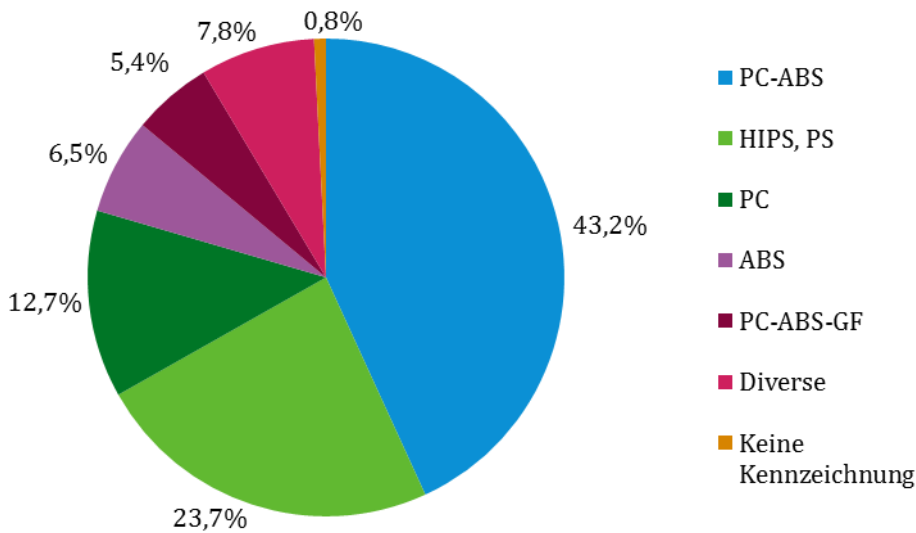


Zur Separierung der Rückseitenabdeckung mussten bei DUT\_7 21 Schrauben, eine Kabelverbindung sowie Clips entlang aller Seiten gelöst werden (Dimitrova, o.J.).

Quelle: Dimitrova, o.J.

Bei der Demontage wurde festgestellt, dass die Kunststofftypenkennzeichnung bei allen wesentlichen Gehäuseelementen aufgebracht wurde. Abbildung 47 gibt einen Überblick über die, laut Kennzeichnung, in den Produkten verwendeten Basispolymere und deren Massenanteile am Gesamtaufkommen, der untersuchten Stichprobe. Hier lässt sich bereits ablesen, dass knapp 92 Prozent der Kunststoffteile der untersuchten Geräte aus drei verschiedenen Basispolymeren bzw. Polymerblends bestehen. Mit 43,2 Prozent wird ein Polymerblend aus PC und ABS am häufigsten eingesetzt, gefolgt von HIPS mit 23,7 Prozent, PC mit 12,7 Prozent, ABS mit 6,5 Prozent und glasfaserverstärktes PC-ABS mit 5,4 Prozent. Die Kategorie „diverse“ Kunststoffe, mit 7,8 Prozent am Gesamtaufkommen, enthält eine Mischung von Stoffelementen, die jedoch ebenfalls aus den gleichen Basispolymeren bzw. Polymerblends zusammengesetzt sind, sich jedoch nicht zur einzelnen Massebestimmung voneinander trennen ließen. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass nahezu 100 Prozent der Kunststoffteile in der untersuchten Stichprobe aus PC-ABS, PC, ABS oder HIPS bestehen.

Abbildung 47 Massenanteile der eingesetzten Kunststofftypen an den untersuchten Flachbildschirmfernsehern anhand der Kunststoffkennzeichnung



Quelle: Eigene Darstellung, Technische Universität Berlin

Tabelle 17 listet die Kunststoffkennzeichnung nach den wesentlichen Gehäuseelementen der untersuchten Geräte auf (Basispolymere, Flammenschutzmittel und Verstärkungen). Ein Muster, welcher Kunststofftyp für welches Gehäuseelement eingesetzt wird, ist nicht zu erkennen. Es lässt sich jedoch erkennen, dass im Frontrahmen vergleichsweise häufiger Glasfasern zur Verstärkung zugesetzt werden als in anderen Gehäuseelementen. Es konnte im Rahmen des Forschungsvorhabens nicht geprüft werden, ob Gehäuseelemente, bei denen laut Kennzeichnung kein Flammenschutzmittel angezeigt ist, auch tatsächlich kein Flammenschutzmittel enthalten ist (bspw. Rückwand DUT\_10). Es wird jedoch anhand der Daten davon ausgegangen, dass die Mehrheit der Gehäuseelemente aus Kunststoff mit Zusatz von Flammenschutzmitteln gefertigt wird.

Tabelle 17: Kunststoffkennzeichnung in den wesentlichen Gehäuseelementen der untersuchten Flachbildschirmfernseher

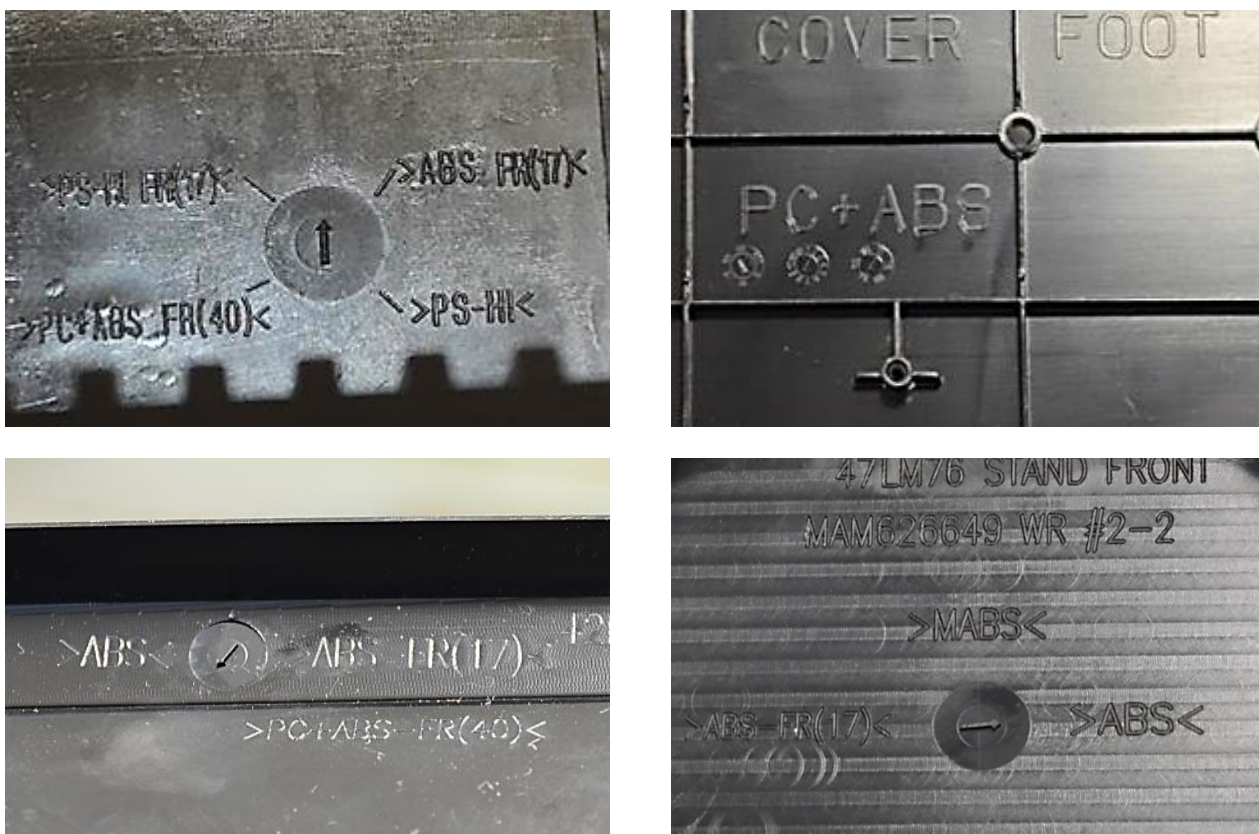
Gerät	Rückwand	Standfuß	Frontrahmen	Weitere Gehäuseelemente
DUT_1	PC-ABS+VO*	n.v.	ABS+HB**	n.v.
DUT_2	PC+FR40 PC-ABS	PC+GF20, PC-ABS, HIPS, PC FR40	PC-ABS-GF+FR40, PC+FR40	ABS
DUT_3	PS-HIPS+FR17	PC-ABS-GF15, ABS+FR40	PS-HIPS+FR17	-
DUT_4	HIPS+FR17	ABS, PC-ABS-GF30	PC-ABS-GF15, PC- GF10+FR40	n.v.
DUT_5	ABS, MABS	ABS+FR17	PC	-
DUT_6	PS-HIPS+FR40, ABS+FR17	PC-ABS+FR40	PC-ABS+FR40, PC- ABS+GF15	-
DUT_7	PC-ABS+FR40	-	PC-ABS+FR40, PC- ABS+GF15	PC-ABS+FR
DUT_8	HIPS/ABS+FR17***	PC-ABS+FR40	PC-ABS+FR40, PC- ABS+GF15	PC-ABS+FR40; teils n.v.

Gerät	Rückwand	Standfuß	Frontrahmen	Weitere Gehäuse-seeelemente
DUT_9	PC-ABS+FR40	ABS, PC-ABS	PC-ABS+GF10+FR40	-
DUT_10	PC-ABS	PS, teils n.v.	HIPS, PC-ABS+GF15	-
DUT_11	PC-ABS+FR40	PS, teils n.v.	HIPS, PC-ABS+GF15	-
DUT_12	HIPS+FR17	PC-ABS+FR40	ABS+FR17, PC-ABS+GF15	HIPS+FR17, PC+FR40

Legende: n.v.: keine Kunststoffkennzeichnung vorhanden; \* Vertikalbrennprüfung nach UL94 / IEC 60695; \*\* Horizontalbrennprüfung nach UL94 / IEC 60695; \*\*\* Kennzeichnung nicht eindeutig

Bei den Demontageversuchen wurde weiterhin festgestellt, dass die Kunststofftypenkennzeichnungen nicht einheitlich und nicht immer einsehbar sind. Abbildung 48 stellt beispielhaft einige der Formate dar, mit denen Kunststoffteile der untersuchten Stichprobe gekennzeichnet waren. Neben der Vielfalt der Kennzeichnung traten bei zwei Fernsehern auch offensichtlich fehlerhafte Kennzeichnungen auf. Bei zwei Fernsehern konnte die Kunststoffart auf den Rückwänden nicht zugeordnet werden. Die Markierung in Form eines Pfeils zeigte in eine Richtung, in der keine Kunststoffart angegeben war, im anderen Fall genau zwischen zwei Kunststoffarten. Teilweise war die Kennzeichnung der Kunststoffarten auch überklebt, was eine Zuordnung erschwert (Abbildung 49).

Abbildung 48: Beispiele für verschiedene Formate der Kunststoffkennzeichnung



Häufig werden bis zu vier Kennzeichnungen für unterschiedliche Kunststofftypen in ein Werkstück eingeprägt und ein justierbarer Pfeil deutet auf den tatsächlich eingesetzten Kunststoff. In den Beispielbildern links zeigt der Pfeil jedoch zwischen zwei Kunststofftypen. Oftmals kommen einfache Einprägungen des eingesetzten Basispolymers zum Einsatz (oben rechts).

Quelle: Eigene Darstellung, Technische Universität Berlin

Abbildung 49: Beispiel für eine nicht unmittelbar einsehbare Kunststofftypenkennzeichnung



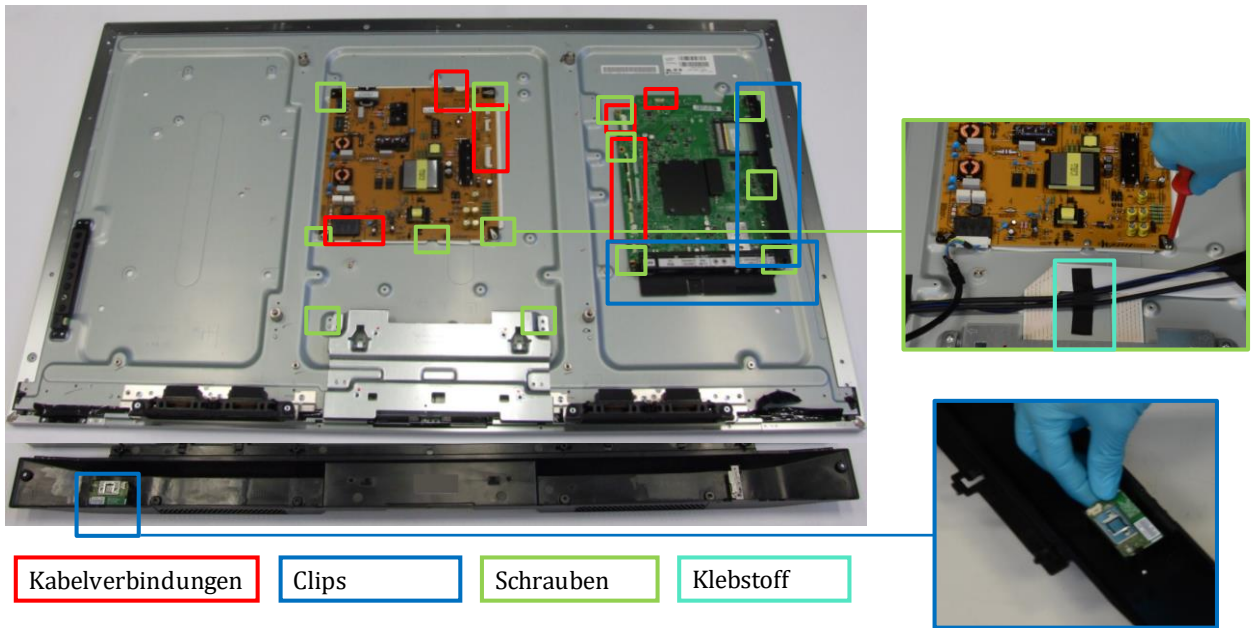
Quelle: Eigene Darstellung, Technische Universität Berlin

Das Projekt CloseWEEE führte Messungen zur Prüfung der Basispolymere laut Kennzeichnung mittels Infrarotspektroskopie durch. Von 14 bemessenen Proben (Kunststoffteile verschiedener Gehäuseelemente der untersuchten Flachbildschirmfernseher) war bei zwei das Basispolymer nicht korrekt gekennzeichnet (HIPS statt PC bzw. PC-ABS statt PC). Weitere Messungen an mehr Probenmaterial verschiedener Geräte (inkl. TV, Notebooks, Drucker, Smartphones) sind im Projektplan von CloseWEEE vorgesehen. Weiterhin finden Bemessungen der Konzentration an Bromverbindungen mittels Röntgenfluoreszenzanalyse statt, um die Kennzeichnung des Flammschutzmitteltyps zu prüfen. Die Ergebnisse lagen zum Zeitpunkt der Berichtsfassung noch nicht vor.

### Leiterplatten

Nach der Separierung der Rückwand liegen die wesentlichen Leiterplatten frei, sind jedoch mittels Schrauben an ein Gerüst aus Metall montiert und mit Kabelverbindungen untereinander und mit dem Display verbunden. Zur Entnahme der Leiterplatten mussten zwischen 8 (DUT\_4) und 29 (DUT\_12) Schraubverbindungen und zwischen 4 (DUT\_6) und 20 (DUT\_11) Kabelverbindungen gelöst werden, wie beispielhaft anhand DUT\_5 in Abbildung 50 sowie anhand DUT\_11 in Abbildung 51 dargestellt.

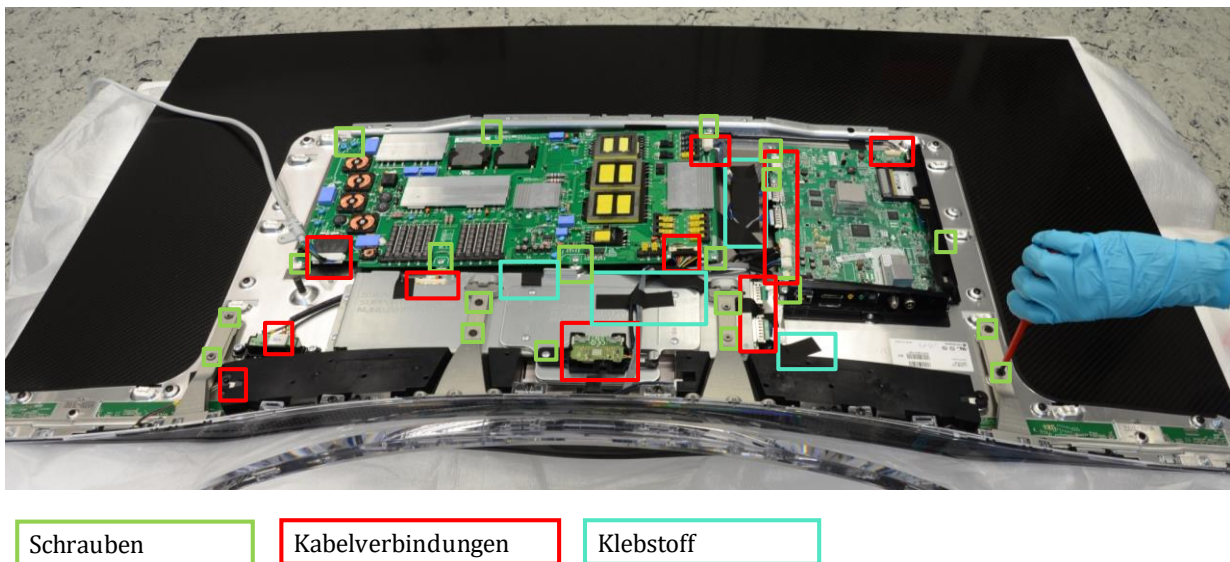
Abbildung 50: Separierung der Leiterplatten aus einem geöffneten LED-LCD-TV anhand DUT\_5



Zum Separieren der Leiterplatten aus DUT\_5 mussten 15 Kabelverbindungen, 13 Schrauben, 16 Clips und 16 Klebstreifen gelöst werden (Dimitrova, o.J.).

Quelle: Dimitrova, o.J.

Abbildung 51: Separierung der Leiterplatten aus einem geöffneten OLED-TV anhand DUT\_11



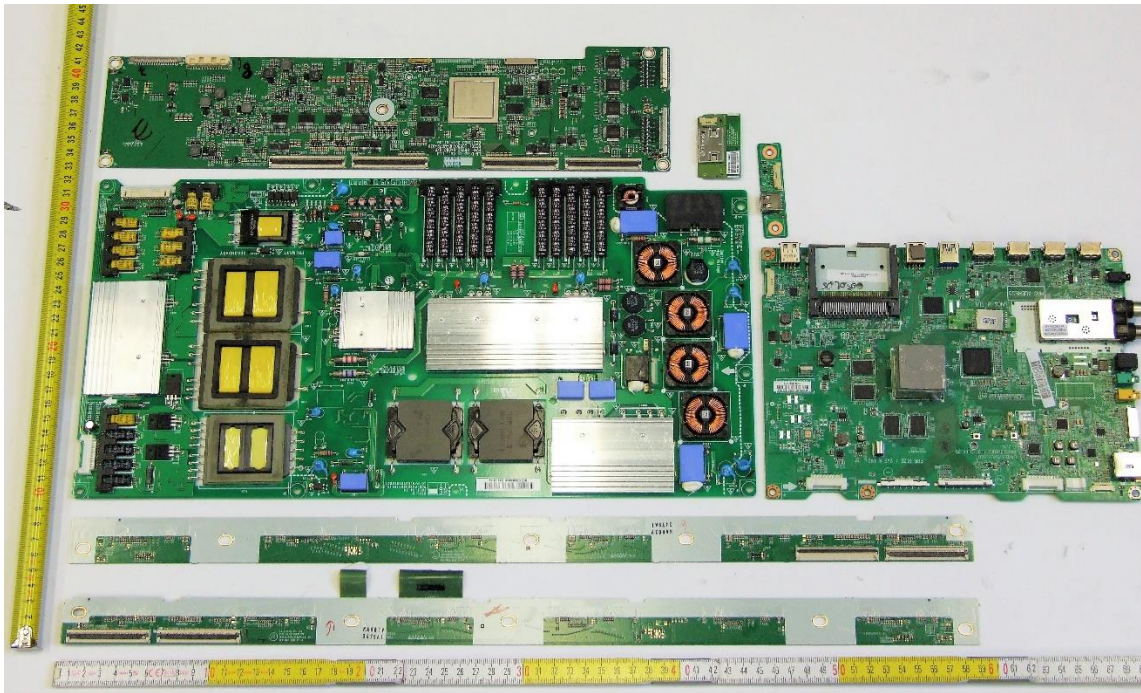
Zum Separieren der Leiterplatten aus DUT\_11 mussten 20 Kabelverbindungen, 29 Schrauben und 19 Klebstreifen gelöst werden (Dimitrova, o.J.).

Quelle: Dimitrova, o.J.

Es wurde festgestellt, dass in der Mehrzahl der untersuchten Geräte zwei, von der Fläche her wesentliche, Leiterplatten montiert sind, und eine variable Zahl von im Verhältnis kleineren Leiterplatten. An-

hand der verbauten elektronischen Bauelemente kann angenommen werden, dass die großen Leiterplatten das Netzteil (oftmals braune Leiterplatte, siehe Abbildung 53) sowie die Logik des Fernsehers beinhalten. Die kleineren Leiterplatten dienen beispielsweise der Ansteuerung des Displays und der Hintergrundbeleuchtung (bei LED-LCD). Bei DUT\_4 hingegen waren Netzteilbauelemente auf dem Mainboard aufgebracht. Hier wird potentiell die Gefahr gesehen, dass bei einem Netzteildefekt das gesamte Mainboard ausgetauscht werden muss.

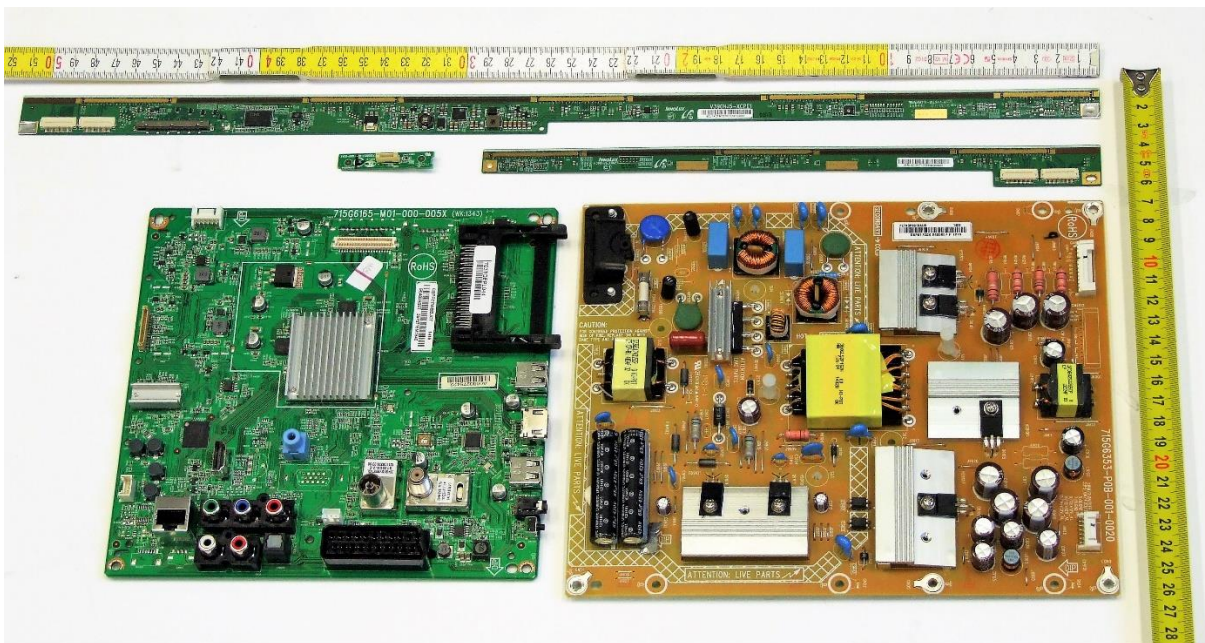
Abbildung 52: Leiterplatten aus dem OLED-TV DUT\_11



Die Leiterplatte mit der größten Fläche erfüllt die Funktion eines Netzteils (Netzteilplatine). Neben Kupferspulen sind hier auch Kühlkörper aus Aluminium aufgebracht. Die Gesamtfläche der Leiterplatten beträgt etwa 0,2 m<sup>2</sup> (Dimitrova, o.J.).

Quelle: Dimitrova, o.J.

Abbildung 53: Leiterplatten aus dem LED-LCD-TV DUT\_9



Auch hier ist die Netzteilplatine die Leiterplatte mit der größten Fläche (Farbe: braun). Die Gesamtfläche der Leiterplatten liegt bei unter 0,1 m<sup>2</sup> (Dimitrova, o.J.).

Quelle: Dimitrova, o.J.

Die Masse der Leiterplatten schwankte zwischen rund 160 Gramm (DUT\_1) und gut 1,3 Kilogramm (DUT\_11) und lag im Durchschnitt bei gut 720 Gramm je Gerät. Die Masse der Leiterplatten skalierte in etwa mit der Größe der eingesetzten Displaypanels.

### Displayeinheit

Zur Separierung des Displaypanels mussten beim OLED-TV (DUT\_11) nach dem Lösen der Rückwand insgesamt weitere 18 Schrauben, welche die Lautsprecher, die Standfüße und die Leiterplatten zur Ansteuerung des Panels halten, gelöst werden. Das Displaypanel selbst war magnetisch auf dem stützenden Metallgerüst montiert (Abbildung 54) und lies sich manuell separieren. Bei LED-LCD TVs müssen ebenfalls Schrauben, Clips und teilweise Klebstoffverbindungen gelöst werden, bevor der Frontrahmen separiert und das Displaypanel entnommen werden kann. In Summe ist der Aufwand zur manuellen Entnahme der Displaypanels als hoch einzuschätzen.

Abbildung 54: Separierung des Displaypanels des OLED TV vom stützenden Gerüst



Nach dem Lösen der Schrauben auf der Rückseite zur Separierung der Leiterplatten konnte das Displaypanel vom Stützgerüst getrennt werden. Das Panel selbst wurde lediglich mittels einer flächigen, stark magnetischen Schicht am Stützgerüst gehalten (Dimitrova, o.J.).

Quelle: Dimitrova, o.J.

### Weitere Besonderheiten in der Konstruktion des OLED TVs

Bei dem ausgewählten OLED-Fernseher war zunächst augenscheinlich, dass die Rückwand komplett verschlossen war und keine sonst üblichen Lüftungsschlitze besaß. Um die im Gerät entstehende Wärme abzuführen, verbaute der Hersteller viele Wärmeleitpads und Wärmeleitfolien (Werkstoffe: insbesondere Aluminium und Kupfer, in den Klebepasten auch Silber). Von der Wärmequelle, dem elektronischen Bauteil ausgehend, wird die Wärme über das Fernsehergehäuse abgeführt. Genügte bei einigen Bauteilen mit starker Wärmeentwicklung noch das Aufkleben eines Aluminiumkühlkörpers, mussten beim Hauptprozessor mehrere Kühloptionen angewendet werden. Auf dem Hauptprozessor wurde ein Aluminiumkühlkörper geklebt, darauf ein Wärmeleitpad, dieses Pad war verbunden mit einem Wärmeleitblech, auf dem Blech wurde ein zweites Wärmeleitpad geklebt, welches mit einer wärmeleitenden Kupferfolie verbunden war, die wiederum großflächig auf der Gehäuserückseite aufgeklebt war.

Grund für die geringe Bautiefe ist, dass die bildgebende Einheit bei OLED-Fernsehern an sich schmäler als zwei Millimeter ist und die bilderzeugende OLED-Einheit nur noch wenige hundert Mikrometer misst. Um die in den letzten Jahren immer größer gewordene Bildschirmdiagonale (beim ausgewählten Gerät: 55 Zoll) verwindungssteif und dennoch leicht zu konstruieren, bedienen sich die Hersteller einiger Optionen. Das ausgewählte Produkt wurde vom Hersteller so konstruiert, dass im unteren sowie mittleren, i.d.R. weitgehend nicht sichtbaren, Teil des Fernsehers viel Stützstruktur durch Zuhilfenahme stabiler Stahlträger verbaut wurde. Dadurch ist der untere Teil des Fernsehers extrem steif, was sich nach oben hin bis zum oberen Fernseherende hin auswirkt. Nachteilig sind u.a. der hohe Materialaufwand sowie die immense Gewichtszunahme. Die bilderzeugende OLED-Einheit besitzt auf der Rückseite aufgeklebte sehr dünne Metallplatten.

Die für gewöhnlich verbaute Rückwand aus i.d.R. PC-ABS- oder HIPS-Kunststoff fällt beim ausgewählten Gerät weg; an ihre Stelle tritt eine Metall-Kunststoff-Konstruktion in stoffschlüssiger Bauart. Bestehend aus einer etwa 1,5 Millimeter dicken Aluminiumplatte, einer etwa 1,5 Millimeter dicken Kunststoffplatte, auf die wiederum eine etwa 1,5 Millimeter dicke Aluminiumplatte aufgeschweißt wird.

### 3.6.6 Ergänzende Erkenntnisse

Zum Zeitpunkt des Verfassens dieses Berichts ist absehbar, dass sich der Markt der Flachbildschirmfernseher von der bislang dominanten Technologie der LED-Hintergrundbeleuchteten LCD Fernseher hin zur OLED Technologie bewegt. Einige Modelle setzen dabei auf eine Trennung der Bildeinheit (OLED Panel) und der übrigen Elektronik, einschließlich Lautsprecher. Dieser modulare Ansatz wird, ohne eine detaillierte Bewertung im Rahmen dieses Vorhabens vornehmen zu können, aus Sicht der Materialeffizienz als positiv eingeschätzt. Als weitere Technologie neben OLED werden von einigen Herstellern LCD Panels mit der sogenannten Quantum Dot Technologie verbaut. Eine Auswirkung auf das Produktdesign wird durch diese Panels im Vergleich zu den marktüblichen LCD Panels nicht gesehen.

Ein Trend, der schon in den LED-Flachbildschirmfernsehern zu beobachten war, konnte in verstärkter Ausprägung auch beim OLED-Fernseher gesehen werden. Die verbauten Lautsprecher sind heute i.d.R. deutlich aufwendiger konstruiert, um aus kleiner Größe und flacher Bauart gleichbleibende Soundleistung zu erzeugen. Wurde früher das Gehäuse als Klangkörper teils mitgenutzt, ist dies heute nicht mehr möglich. So gehen die Hersteller heute dazu über, die zur Klangerzeugung notwendigen Resonanzkörper aus glasfaserverstärktem Kunststoff herzustellen. Diese oftmals schneckenförmig aufgebauten Resonanzkörper brauchte es früher nicht, zudem sind die Kunststoffgemische zum einen potentiell störend für andere Kunststoffsammlerfraktionen, durch ihre Glasfaseranteile, und zum anderen gibt es keine gängigen Recyclingverfahren für diese Kunststoffgemische.

### 3.6.7 Zusammenfassung

Flachbildschirmfernseher stellen den größten potentiellen Massenstrom der untersuchten Fallstudien im Recycling dar. Es wird mit einem leichten Anstieg bis 2020 und etwa gleichbleibend hohem Altgeräteaufkommen bis ins Jahr 2025 gerechnet. Für die Absatzzahlen von Flachbildschirmfernseher wird in Deutschland über den Zeitraum von 2015 bis 2025 eine leichte Zunahme prognostiziert.

Neben dem im Vergleich der vier Produktgruppen höchsten Edelmetallaufkommen, ist im potentiellen Abfallaufkommen von Flachbildschirmfernsehern speziell Tantal in recyclingrelevanten Mengen verbaut. Bei den verwendeten Polymerwerkstoffen werden Flachbildschirmfernsehern ebenfalls die größten Massenpotentiale zugeschrieben. Hier dominieren bei den untersuchten Geräten PC-ABS und HIPS, mit Anteilen von rund 65 und 35 Prozent.

Zur Demontage der TV Geräte musste zunächst jeweils die Rückwand separiert werden. Hierzu war das Lösen etlicher Schraubverbindungen und Clips notwendig. Anhand der untersuchten Stichprobe konnte kein Einsatz von Klebstoffen für den Verschluss der Gehäuseelemente beobachtet werden. Die Rückwände sind große Kunststoffgehäuseteile, die bei einer manuellen Demontage als Ganzes separiert werden. In den Gehäuseteilen werden sehr häufig Flammenschutzmittel eingesetzt. Ein stoffliches Recycling kann daher nur erfolgen, wenn sich Recyclingprozesse für flammenschutzmittelversetzte Kunststoffe durchsetzen. Weiterhin sind in den Gehäuseteilen, insbesondere den Frontrahmen, häufig Glasfaserverstärkungen eingebracht, welche die Geräte robuster machen sollen, jedoch das Kunststoffrecycling stören.

Die Leiterplatten sind von der Fläche und Masse relevant für ein stoffliches Recycling. Eine gute Separierbarkeit sollte im Produktdesign vorgesehen werden oder durch entsprechende Behandlungsanforderungen adressiert werden.

### 3.7 Fallstudie 4: Schreibtischdrucker

#### 3.7.1 Marktdaten und Altgeräteaufkommen

In Tabelle 18 sind der deutschlandweite und weltweite Absatz von Druckern für das Jahr 2015, sowie Absatzprognosen für Deutschland für die Jahre 2020 und 2025 angegeben. So wurden im Jahr 2015 in Deutschland rund 0,6 Millionen Drucker abgesetzt. Für die Jahre 2020 und 2025 wird mit je rund 0,5 Millionen verkauften Druckern ein leichter Rückgang der Absatzzahlen in Deutschland prognostiziert. Für den weltweiten Absatz von Druckern konnten lediglich Zahlen für das Jahr 2015 recherchiert werden. Im Jahr 2015 lag der weltweite Absatz bei rund 103,3 Millionen verkauften Einheiten (IDC 2017a).

Mit der Modellrechnung von Stobbe et al. (2015) und den in Tabelle 6 definierten Verweildauern wird das potentielle Altgeräteaufkommen für Drucker in Deutschland abgeschätzt. Demnach wurden 2015 rund 2,2 Millionen Drucker in deutschen Haushalten nicht mehr verwendet und standen potentiell dem Recycling zur Verfügung. Im Jahr 2020 wird diese Zahl voraussichtlich auf rund 1,2 Millionen Geräte und bis zum Jahr 2025 nochmals auf rund 0,7 Millionen Geräte zurückgehen.

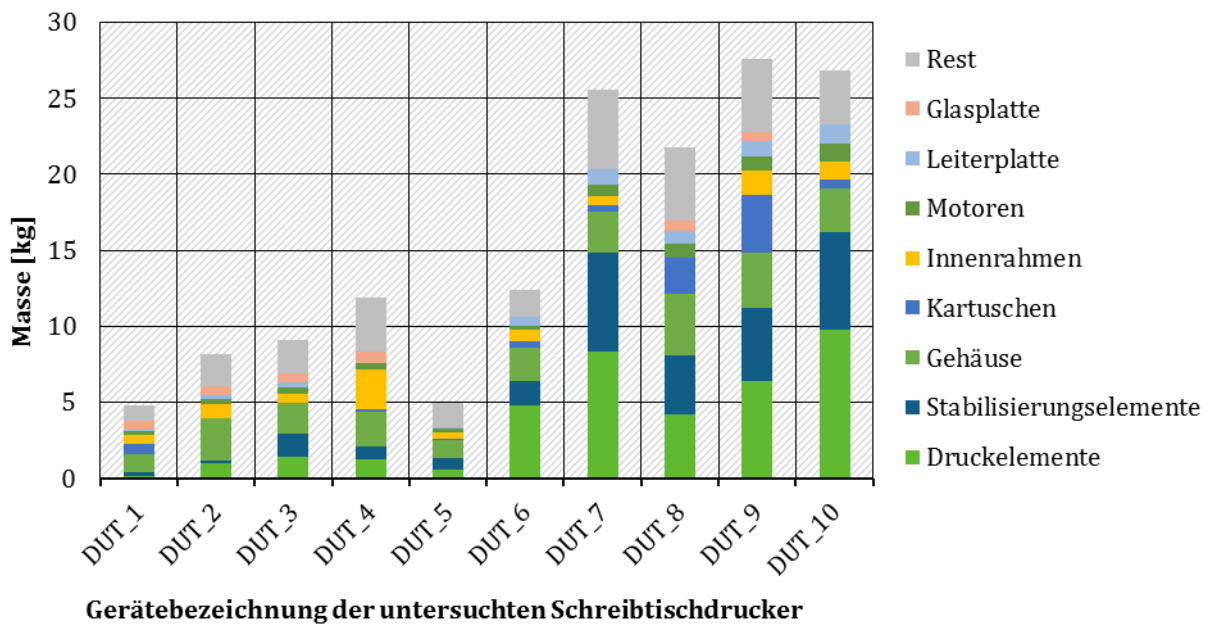
Tabelle 18: Schreibtischdrucker: Absatz und potentielles Altgeräteaufkommen

	2015 [Mio. Stk.]	2020 [Mio. Stk.]	2025 [Mio. Stk.]
Absatz (weltweit) (IDC 2017a)	103,3	-	-
Absatz (D) (Stobbe et al. 2015)	0,6	0,5	0,5
Potentielltes Altgeräteaufkommen (D)	2,2	1,2	0,7

#### 3.7.2 Stoffliche Zusammensetzung und Recyclingpotential

Die stoffliche Zusammensetzung mit Fokus auf die für das Vorhaben relevanten Zielstoffe (Kapitel 3.1.1) wurde anhand von Daten aus den durchgeführten Demontageversuchen (Kapitel 3.7.5) sowie Angaben aus der Literatur ermittelt. Abbildung 55 zeigt die Zusammensetzung der demontierten Schreibtischdrucker nach den wesentlichen Komponenten. Es wurden insgesamt zehn Geräte untersucht, fünf Drucker mit Tintenstrahltechnik (DUT 1-5) und fünf Geräte mit Lasertechnik (DUT 6-10). Zwischen beiden Gruppen wurde ein deutlicher Unterschied hinsichtlich ihrer Gesamtmasse sowie der Massenanteile der wesentlichen Komponenten festgestellt.

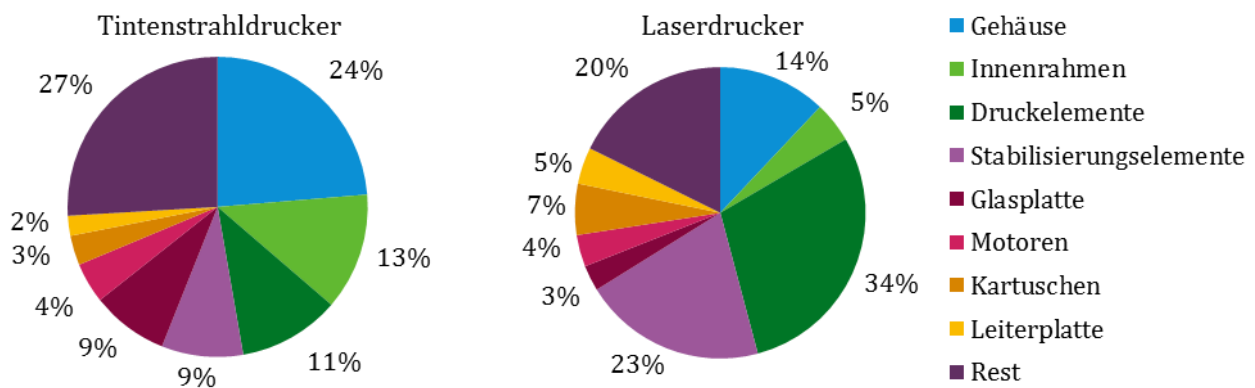
Abbildung 55: Massen der wesentlichen Komponenten der untersuchten Schreibtischdrucker



Quelle: Eigene Darstellung, Technische Universität Berlin

Abbildung 56 zeigt die durchschnittliche Zusammensetzung der untersuchten Tintenstrahl- und Laserdrucker auf Komponentenebene. Das Gesamtgewicht des durchschnittlichen Tintenstrahl Druckers lag bei 7,8 kg, das des durchschnittlichen Laserdruckers mit 22,8 kg deutlich höher. Bei den untersuchten Tintenstrahl Druckern hat das Kunststoffgehäuse mit durchschnittlich 24 Prozent den größten Anteil am Gesamtgewicht, gefolgt vom Innenrahmen (i.d.R. ebenfalls Kunststoff) mit 13 Prozent und den Druckelementen mit 11 Prozent. Die verbauten Leiterplatten hatten mit durchschnittlich 2 Prozent einen deutlich geringen Gewichtsanteil am Gesamtgerät als bei den anderen untersuchten Produktgruppen. Elektromotoren machten, sowohl bei Laser- als auch bei Tintenstrahl Druckern, einen Anteil von rund 4 Prozent des Gesamtgewichts aus. Bei den Laserdruckern stellten die Druckelemente mit durchschnittlich 34 Prozent den größten Gewichtsanteil dar, gefolgt von den Stabilisierungselementen mit 23 Prozent und dem Kunststoffgehäuse mit 14 Prozent.

Abbildung 56: Durchschnittliche Massenanteile der wesentlichen Komponenten der untersuchten Schreibtischdrucker unterteilt in Tintenstrahl- und Lasertechnik



Quelle: Eigene Darstellung, Technische Universität Berlin

In Tabelle 19 werden die potentiellen Massenströme der Zielstoffe resultierend aus dem potentiellen Altgeräteaufkommen von Druckern in den Jahren 2015, 2020 und 2025 hochgerechnet und den Komponenten mit den größten Zielstoffanteilen zugeordnet. Zur Hochrechnung der Abfallaufkommen der Zielstoffe werden einerseits eigene Untersuchungen ausgewertet und andererseits auf Werte aus vorherigen Veröffentlichungen zurückgegriffen. Dazu wird angemerkt, dass es nur um eine grobe Abschätzung der potentiell im Altgeräteaufkommen enthaltenen Stoffmengen geht. Das Ziel dabei ist es, anhand der hochgerechneten Größenordnungen die Relevanz von möglichen Ökodesign-Anforderungen einschätzen zu können. Auch lässt die Darstellung Vergleiche der Größenordnung der Stoffmengen zwischen den Fallstudien zu. So kann abgewogen werden, für welche der Fallstudien welche Stoffe vorrangig adressiert werden sollten. Diesem Ziel einer Grobabschätzung entsprechend wurde keine vertiefte Recherche und Auswertung von verfügbaren Daten aus wissenschaftlicher Literatur vorgenommen.

Es konnten keine verlässlichen Daten zu den Marktanteilen von Schreibtischdruckern mit Tintenstrahl- bzw. Lasertechnik identifiziert werden. Obwohl angenommen wird, dass der Marktanteil der Tintenstrahl drucker im Privatkundenbereich deutlich über dem der Laserdrucker liegt, wurde die vereinfachte Annahme getroffen, dass beide Techniken zu gleichen Teilen in den Markt eingehen. Die berechneten Stoffmengen sind demnach wahrscheinlich überschätzt, da die Masse der untersuchten Laserdrucker im Durchschnitt deutlich über der Masse der Tintenstrahl drucker lag (vgl. Abbildung 55).

Die in dieser Arbeit fokussierten Edelmetalle sind überwiegend in den Leiterplatten (PCB) der Drucker verbaut. Kupfer hat unter den betrachteten Edelmetallen den größten Anteil. Im Jahr 2015 wird die Kupfermenge in den potentiell dem Recycling zur Verfügung stehenden Druckern auf rund 214 Tonnen beziffert. Dieser Anteil sinkt bis zum Jahr 2020 und 2025 voraussichtlich auf rund 169 Tonnen bzw. 100 Tonnen. Rund 60 Prozent des verwendeten Kupfers werden für die Leiterplatte verwendet, nahezu 40 Prozent entfallen auf die verbauten Elektromotoren. Für die Neodymgehalte in den verbauten Elektromotoren ließen sich keine Daten erheben. Es kann jedoch aufgrund der Stückzahlen und Massen der verbauten Elektromotoren von einem relevanten Stoffstrom von Neodym ausgegangen werden. Den weiteren Sondermetallen wird bei Druckern, aufgrund der geringen Stoffmengen von deutlich unter 0,1 Tonnen, nur eine untergeordnete Bedeutung beigemessen.

Die Kunststoffe machen den größten Anteil am potentiellen Recyclingstrom bei Druckern aus. Insgesamt wurden sechs verschiedene Polymere bzw. Polymerblends in nennenswerter Menge in den untersuchten Druckern identifiziert. Polystyrol-Butadien (HIPS) und Acrylnitril-Butadien-Styrol (ABS) stellen den größten Anteil an verbauten Kunststoffen dar und werden überwiegend in den Gehäusen der Geräte verbaut. Für das Jahr 2015 wurde die Stoffmenge von HIPS im potentiellen Altgeräteaufkommen als rund 2.477 Tonnen berechnet. Diese Menge fällt analog zu den Verkaufszahlen in den Jahren 2020 und 2025 auf voraussichtlich 1.340 bzw. 782 Tonnen. Für ABS wird die potentielle Abfallmenge 2015 auf rund 1.423 Tonnen hochgerechnet, welche im Jahre 2020 bzw. 2025 auf 767 bzw. 447 Tonnen fällt.

Tabelle 19: Potentielle Stoffmengen der Zielstoffe aus Alt-Schreibtischdrucker in den Jahren 2015, 2020 und 2025; Komponenten mit dem größten Massenanteil des Zielstoffes

Stoff-kategorie	Zielstoff	Stoffmenge [t]			Komponente*	Datenquelle
		2015	2020	2025		
Edelmetall	Gold	<0,1	<0,1	<0,1	PCB	(Sander et al. 2012)
	Silber	<0,1	<0,1	<0,1	PCB	(Sander et al. 2012)
	Kupfer	214	169	100	PCB, Motor	(Sander et al. 2012), Eigene Messung
	Palladium	<0,1	<0,1	<0,1	PCB	(Sander et al. 2012)

Stoff-kategorie	Zielstoff	Stoffmenge [t]			Komponente*	Datenquelle
		2015	2020	2025		
Sondermetall	Kobalt	<0,1	<0,1	<0,1	PCB	(Sander et al. 2012)
	Neodym				Motor	
	Tantal	<0,1	<0,1	<0,1	PCB	(Sander et al. 2012)
	Gallium	<0,1	<0,1	<0,1	PCB	(Sander et al. 2012)
	Indium					
Kunststoff	ABS	1423	767	447	Gehäuse	Eigene Messung
	PC-ABS	199	100	59	Gehäuse	Eigene Messung
	PC	43	23	14	Gehäuse	Eigene Messung
	HIPS	2477	1340	782	Gehäuse	Eigene Messung
	PMMA					

\*Es werden nur die ein bis zwei Komponenten mit dem deutlich höchsten Anteil eines Zielstoffes angegeben

### 3.7.3 Angenommenes Recyclingszenario

Die im Folgenden beschriebenen Annahmen beruhen auf Informationen aus dem Begleitkreis sowie ergänzenden Literaturrecherchen. Es wird das nach aktuellem Erkenntnisstand in Deutschland typische Recyclingszenario beschrieben. Die Beschreibung ist als spezifizierende Ergänzung zur allgemeinen Beschreibung der Behandlung und dem Recycling von EAG zu betrachten (Kapitel 3.2.3 ff). Das tatsächliche Verfahren mit den Altgeräten in der Praxis unterscheidet sich je nach Behandlungsanlage, deren Abnehmern, als auch Fluktuationen im Preis der produzierten Stoffströme, um nur einige der Einflussfaktoren zu benennen. Es besteht daher kein Anspruch auf Allgemeingültigkeit.

Schreibtischdrucker werden nicht als besonders hochwertige EAG gehandelt, da die Konzentration an Wertstoffen verhältnismäßig gering ist, insbesondere im Vergleich zu Geräten wie Smartphones oder Notebooks. Bei Laserdruckern werden im Sinne der Schadstoffentfrachtung die Tonerkartuschen aus dem Gerät entfernt, um eine übermäßige Staubentwicklung und damit potentiell einhergehende Explosionsgefahr zu verhindern. Weiterhin kommen Tonerkartuschen potentiell für eine Wiederaufbereitung in Frage. Der Rest des Geräts wird anschließend ohne weitere manuelle Demontageschritte in die mechanische Grobzerkleinerung gegeben. Tintenstrahldrucker enthalten Farbe in flüssiger Form. Laut Teilnehmern des Begleitkreises werden daher in der Praxis in der Regel keine manuellen Demontageschritte vorgenommen und das Gerät wird als Ganzes in die mechanische Grobzerkleinerung verbracht. Es wurde angegeben, dass Tintenpatronen und Tintenauffangbehältern nicht manuell entnommen werden und dass sich etwaige Resttinte dissipativ über die Stoffströme der mechanischen Zerkleinerung verteilen. Probleme in nachfolgenden Behandlungsschritten werden nicht gesehen.

### 3.7.4 Bestehende Anforderungen

Im Folgenden werden Anforderungen aus gesetzlichen sowie freiwilligen produktpolitischen Instrumenten aus verschiedenen Quellen zusammengefasst. Dabei werden ausschließlich Kriterien mit einer Relevanz für die Kreislaufführbarkeit von Werkstoffen einbezogen.

#### Gesetzliche Anforderungen

Die Maßgaben aus dem ElektroG sind in Kapitel 3.2.1 und Kapitel 3.2.3 zusammengefasst. Darüberhinausgehende Anforderungen an Drucker sind im ElektroG nicht enthalten.

Im Folgenden werden die wesentlichen Punkte der Selbstregulierungsmaßnahme unter der Ökodesign-Richtlinie<sup>14</sup>, die für dieses Forschungsvorhaben von Bedeutung sind, beleuchtet. Teilnehmende Hersteller der Selbstregulierungsmaßnahme schließen alle relevanten Marktteilnehmer ein, entsprechend fallen alle in diesem Forschungsvorhaben untersuchten Geräte unter die Selbstregulierungsmaßnahme.

Zur Steigerung der Ressourceneffizienz legen die Hersteller die folgenden Anforderungen fest:

- ▶ Kunststoffteile >100g müssen mit gängigem Werkzeug manuell in wiederverwertbare Kunststoffe trennbar sein.
- ▶ Das Gerät soll die am häufigsten verwendeten Verbindungselemente für Verbindungsteile, Baugruppen, Baugruppenträger und Gehäuse verwenden.
- ▶ Nicht-lösbare Verbindungen (verklebt, verschweißt) zwischen verschiedenen Materialien sollen vermieden werden (soweit diese nicht technisch oder rechtlich erforderlich sind).

Kunststoffe betreffend:

- ▶ Kunststoffe sollen nach Materialart gekennzeichnet werden (ISO 11469 mit Bezug auf ISO 1043, Harz-Identifikationscode, SPI, DIN, oder länderspezifisch). Die Kennzeichnungspflicht besteht nicht für Kunststoffteile < 25 g oder mit einer Oberfläche < 50 cm<sup>2</sup>; ausgenommen sind auch Kunststoffteile, die in wiederverwendeten Komplexbauteilen enthalten sind.
- ▶ Um die Anzahl verwendeter Materialien zu reduzieren, dürfen Kunststoffgehäuseteile >100g nur aus einem Polymer oder einer Polymerblend bestehen.
- ▶ Alle Kunststoffgehäuseteile dürfen nur aus bis zu vier trennbaren Polymeren oder Polymermischungen bestehen.
- ▶ Große Gehäuseteile müssen so konstruiert sein, dass enthaltene Kunststoffe durch verfügbare Recyclingtechniken für die Produktion von hochqualitativen langlebigen Geräten genutzt werden können.
- ▶ Die Beschichtungen für Spezialteile sollen auf ein Minimum reduziert werden, sofern nicht eindeutig nachgewiesen werden kann, dass dies keine Auswirkungen auf die Recyclingfähigkeit hat. Galvanische Kunststoffbeschichtungen sind unzulässig.
- ▶ Die Hersteller müssen den Kunden Informationen über den Mindestanteil von recyceltem Kunststoff (berechnet als Gewichtsanteil vom gesamten Kunststoff) für jedes Gerät zur Verfügung stellen.

Ersatzteilverfügbarkeit nach Einstellen der Herstellung

- ▶ Für Elektrofotografie (Laserdruck), Solid Ink und High Performance Inkjet Modelle – 5 Jahre.
- ▶ Für Inkjet Modelle – 3 Jahre.

## Umweltzeichen

Im Folgenden werden die in Kapitel 3.2.2 eingeführten Umweltzeichen hinsichtlich ihrer materialeffizienzbezogenen Designanforderungen für Schreibtischdrucker diskutiert. Im Mittelpunkt stehen die gestellten Anforderungen an die verwendeten Werkstoffe und die recyclinggerechte Konstruktion. In erster Linie werden die Anforderungen des Blauen Engel für Bürogeräte mit Druckfunktion (RAL-UZ 205 2017) diskutiert.

---

<sup>14</sup> Industry Voluntary Agreement to Improve the Environmental Performance of Imaging Equipment Placed on the European Market, VA v.5.2, April 2015

## Verwendete Werkstoffe

Der Blaue Engel fokussiert seine Anforderung in der Materialauswahl überwiegend auf die verwendeten Kunststoffteile. Es werden insgesamt zehn Anforderungen an die Materialauswahl gestellt, von welchen acht als obligatorische und zwei als optionale Anforderungen formuliert sind. So wird gefordert, dass bei Kunststoffbauteilen mit vergleichbarer Funktion nur ein Material einzusetzen ist. Ausgenommen hiervon sind Teile mit einer Masse < 25 g. Außerdem müssen Teile, die aus dem gleichen Kunststoff bestehen, einheitlich oder verträglich gefärbt sein. Es dürfen nur stofflich verwertbare Werkstoffe und Werkstoffverbunde eingesetzt werden. Auch bei Druckern wird der Einsatz von PCR-Kunststoffen ausdrücklich zugelassen, eine optionale Anforderung legt den Anteil an PCR-Kunststoffen auf mindestens fünf Prozent fest. Der Anteil von PCR-Kunststoff muss in Gewichtsprozent bezogen auf die insgesamt eingesetzte Kunststoffmenge in den vom Blauen Engel definierten Intervallen angegeben werden. Kunststoffteile > 25 g und einer Fläche von mindestens 200 mm<sup>2</sup> sind nach ISO 11469 unter Berücksichtigung von ISO 1043 zu kennzeichnen.

## Recyclinggerechte Konstruktion

Die recyclinggerechte Konstruktion wird vom Blauen Engel mit insgesamt zwölf Anforderungen berücksichtigt von denen acht unbedingt und vier optional zu erfüllen sind. Es werden fünf Anforderungen an die Wiederverwendbarkeit von Komponenten definiert, die in diesem Abschnitt mitberücksichtigt werden. Alle Anforderungen an die Wiederverwendbarkeit sind obligatorisch. Hauptziel ist es, eine hinreichende Materialtrennung sowie die Entfrachtung von toxischen Stoffen zu gewährleisten.

Alle Bauteile aus miteinander im Recycling unverträglichen Werkstoffen müssen lösbar oder über Trennhilfen miteinander verbunden sein. Als Trennhilfen können beispielsweise Sollbruchstellen eingeplant werden. Ebenfalls obligatorisch ist die „leichte“ Auffindbarkeit und einfache Entnehmbarkeit von Elektrobaugruppen, um diese dem bestmöglichen Recyclingprozess zuführen zu können. Außerdem sind alle Demontearbeiten mit nicht näher spezifiziertem, allgemein üblichem, im Handel erhältlichem Universalwerkzeug ausführbar zu gestalten. Notwendige Angriffspunkte und Arbeitsräume für Demontagewerkzeuge müssen berücksichtigt werden. Alle Schraubverbindungen zwischen den Baugruppen können mit maximal drei unterschiedlichen Werkzeugen gelöst werden, wobei ein Werkzeug durch die Antriebsart (z.B. Kreuzschlitz) und die Antriebsgröße (Schlüsselgröße) definiert ist. Eine Demontage muss von einer einzelnen Person durchführbar sein. Gehäuseteile dürfen nach dem Blauen Engel keine elektronischen Baugruppen enthalten. Der gesamte Demontageprozess muss vom Hersteller schwachstellenorientiert protokolliert werden.

Die Wiederverwendbarkeit von Komponenten und Baugruppen stellt die aus Umweltsicht effektivste Anforderung dar. Der Blaue Engel definiert fünf Anforderungen, die ein Wiederverwenden von Komponenten und Baugruppen fördern soll. So sollen 50 Prozent der Bauteile eines Gerätes mit anderen Geräten desselben Herstellers der gleichen Leistungsklasse und Generation baugleich sein. Die Farbmodule einzelner Farben lassen sich separat austauschen. Der Einsatz von wiederaufbereiteten Tonermodulen und Tintenmodulen und -behältern wird nicht durch bauliche, softwaregestützte oder sonstige Maßnahmen verhindert.

### 3.7.5 Demontageversuche mit Druckern

Für Demontageversuche mit Druckern standen dem Forschungsvorhaben zehn Geräte aus dem B2C Bereich von neun verschiedenen Herstellern zur Verfügung, darunter fünf Tintenstrahldrucker und fünf Laserdrucker. Eine Beschreibung der Geräte ist in Tabelle 20 aufgeführt.

Tabelle 20: Beschreibung der untersuchten Drucker

Bezeichnung	Hersteller	Drucktechnik	Funktionsumfang	Markteintritt	Marktsegment*
DUT_1	Hersteller 1	Tintenstrahl	Multifunktionsdrucker	2015	Hoch
DUT_2	Hersteller 2	Tintenstrahl	Multifunktionsdrucker	2015	Mittel
DUT_3	Hersteller 3	Tintenstrahl	Multifunktionsdrucker	2015	Mittel
DUT_4	Hersteller 4	Tintenstrahl	Multifunktionsdrucker	2015	Mittel
DUT_5	Hersteller 1	Tintenstrahl	Farbdrucker	2015	Niedrig
DUT_6	Hersteller 5	Laser	Farbdrucker	2015	Mittel
DUT_7	Hersteller 6	Laser	Farbdrucker	2015	Mittel
DUT_8	Hersteller 7	Laser	Multifunktionsdrucker	2015	Hoch
DUT_9	Hersteller 8	Laser	Multifunktionsdrucker	2015	Hoch
DUT_10	Hersteller 9	Laser	Farbdrucker	2015	Mittel

DUT = Device Under Test; \* Preisspanne bei Markteintritt: hoch = > 250 €; mittel = 150 – 250 €; niedrig = >150 €;

Die Geräte unterscheiden sich anhand verschiedener Funktionen und Merkmale. Beispielsweise ist der Tintenstrahldrucker DUT\_1 ein Gerät mit Scanner-, aber ohne Faxfunktion. Hervorzuheben ist, dass DUT\_1 über ein integriertes Tintentanksystem verfügt. Der Tintenstrahldrucker DUT\_2 ist ein Multifunktionsgerät (Drucker-Scanner-Kombigerät mit Faxfunktion), der einen Touchscreen mit Farbdisplay aufweist. Der Laserdrucker DUT\_8 fällt unter die Kategorie Farblaser-Multifunktionsdrucker mit Touchscreen und Farbdisplay.

Zur Vereinfachung und zur besseren Lesbarkeit wird in diesem Bericht nur unterschieden zwischen einfachen Druckern und Multifunktionsdruckern, die neben der Funktion als Drucker über eine Scan- und Kopierfunktion verfügen. Das Vorhandensein einer Faxfunktion wird nicht berücksichtigt, da es in der untersuchten Stichprobe keinen sichtbaren Einfluss auf den Aufbau der Geräte hatte. Entgegen der Annahme, dass einfache Drucker generell einen kleineren Formfaktor als Multifunktionsgeräte aufweisen könnten, waren die Abmessungen beider Gerätegruppen der Stichprobe nicht durch den Funktionsumfang bedingt.

Wie in Kapitel 1.2 beschrieben, wurden die Demontagen möglichst zerstörungsfrei durchgeführt. Eine Behandlung der Geräte im Zuge der Erstbehandlung kann nur bedingt abgebildet werden. Dennoch erlauben die Demontagen detaillierte Erkenntnisse zu unterschiedlichen Designstrategien seitens der Hersteller sowie eine Abschätzung der Auswirkung auf die Kreislaufführbarkeit der enthaltenen Zielstoffe.

Die Auswahl der Zielkomponenten ergibt sich weitestgehend aus den in Abbildung 56 und insbesondere in der Tabelle 19 dargestellten Massenanteile der Komponenten am Gesamtgerät und der Komponenten mit dem dominierenden Anteil der jeweiligen Zielstoffe. Dementsprechend sind die Komponenten besonders relevant, die den größten Anteil mindestens einer der Zielstoffe beinhalten.

Abbildung 57: Beispielhafte Darstellung der Zielstoffe und Zuordnung zu Drucker Komponenten



Quelle: Eigene Darstellung, Technische Universität Berlin

Es wurde angestrebt, den im Folgenden aufgelisteten, einheitlichen Ablauf bei der Demontage der Geräte zu etablieren. Zur Orientierung wurde der „Dismantling Guide for IT Equipment“ (Schluep et al. 2015) herangezogen. Diese Reihenfolge konnte jedoch nicht immer eingehalten werden, da vier der zehn untersuchten Geräte keine Scannereinheit aufwiesen. Wie eingangs bereits erwähnt, konnte der Tintenauffangbehälter bei Tintenstrahldruckern nicht bzw. nur durch einen umfassenden Demontageprozess separiert werden.

- ▶ Entnahme der Kartuschen
- ▶ Öffnung des Kunststoffgehäuses
- ▶ Demontage der Scannereinheit (Lichtquelle, Glass)
- ▶ Entnahme der bildgebenden Einheit
- ▶ Entnahme der Leitplatten
- ▶ Entnahme des Auffangbehälters

Da es sich bei Tintenstrahldruckern und Laserdruckern um zwei grundlegend unterschiedliche Technologien handelt, die parallel am Markt bestehen, wird in Tabelle 21 kurz auf wesentliche Unterschiede bezüglich der Zielkomponenten der Geräte eingegangen.

Tabelle 21: Wesentliche Unterschiede zwischen Tintenstrahl- und Laserdruckern bzgl. der Zielkomponenten

Tintenstrahldrucker	Laserdrucker
<b>Bildgebende Einheit</b>	
Die Druckkopfeinheit bei Tintenstrahldruckern wird auf einer Fixier- bzw. Führungsstange stabil geführt. Das Druckbild wird i.d.R. zeilenweise mit Hilfe mehrerer Düsen auf das Medium übertragen. Für jede Farbe werden unterschiedliche Düsenanordnungen verwendet.	Das Abbild entsteht bei Laserdruckern mittels elektrostatischer Ladung, mit dem Einsatz einer Entwicklerwalze sowie eines Lasers. Aufgrund der Verwendung verschiedener Tonerpulversorten können farbige Abbilder entstehen.
<b>Stützendes Gerüst</b>	
Bei Tintenstrahldruckern besteht das innere stützende Gerüst aus einem bzw. wenigen Kunststoffelement/en. Die einzelnen Druckerkomponenten werden mit Hilfe des stützenden Gerüsts in das System Drucker eingebettet.	Bei Laserdruckern besteht das innere stützende Gerüst aus mehreren Stabilisierungsschienen aus Metall.
<b>Kartuschen/Patronen</b>	
Der Patroneninhalt bei Tintenstrahldruckern besteht aus Tintenflüssigkeit. Die Größe der Patronen abhängig von der allgemeinen Leistung des Druckers (bei Multigeräten generell größer als bei „einfachen“ Geräten).	Kartuscheninhalt bei Laserdruckern besteht aus Tonerpulver. Bei Laserdruckern in der untersuchten Stichprobe tendenziell größer als bei Tintenstrahldrucker.
<b>Auffangbehälter</b>	
Bei Tintenstrahldruckern wird die überschüssige Tintenflüssigkeit aus der Druckkopfeinheit in Tintenauffangbehälter geleitet, welche aus mehreren Fasermatten bestehen.	Bei Laserdruckern wird das nach jedem Druckvorgang entstandene Resttonerpulver in einen austauschbaren Auffangbehälter geleitet bzw. geführt.

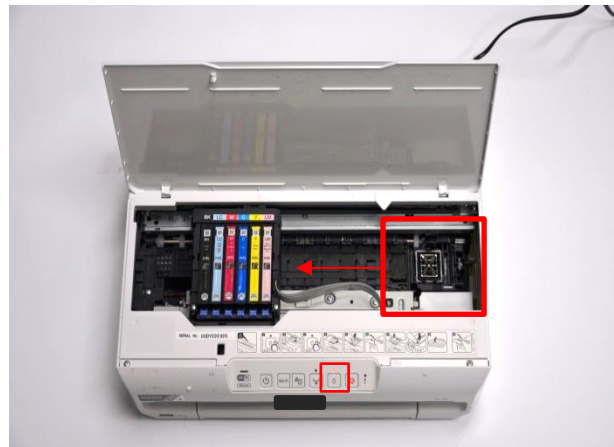
### Entnahme der Kartuschen/Patronen

Die Entnahme der Tintenpatronen aus den Geräten DUT\_2, DUT\_3 und DUT\_4 ließ sich mit geringerem Aufwand vornehmen. Im Gegensatz dazu musste das Gerät DUT\_5 eingeschaltet werden, um die Patronen entfernen zu können. Ohne Stromversorgung waren diese teilweise von der Abdeckung des Druckergehäuses verdeckt und konnten nicht entnommen werden (Abbildung 58). DUT\_1 nimmt eine Sonderstellung ein, da hier statt Tintenpatronen zum Auswechseln vier nachfüllbare Tintentanks (schwarz, blau, gelb, rot) eingesetzt werden, die der Nutzer selbst nachfüllen kann. Die manuelle Demontage des Tintenstrahldruckers war sehr aufwendig, da der Tintentank mit extremer Vorsicht entfernt werden muss. Andernfalls kann die Tinte bei unsachgemäßer Behandlung oder aufgrund fehlenden Know-hows bzgl. des Produktaufbaus, umliegende Druckerkomponenten oder Materialien kontaminieren (Abbildung 58).

Abbildung 58: Entnahme der Tintenpatronen anhand DUT\_1 und DUT\_5



DUT\_1: Zur Entnahme der im Gerät verbauten Tintenpatrone musste der Drucker vollständig demontiert werden



DUT\_5: Die Tintenpatronen sind rechts teilweise von der Gehäuseabdeckung verdeckt, bis der Drucker mit dem Strom verbunden und eingeschaltet wird

Quelle: Eigene Darstellung, Technische Universität Berlin

Die Tonerkartuschen aller untersuchten Laserdrucker (DUT\_6 bis DUT\_10) konnten ohne Anschluss an das Stromnetz mit wenigen Handgriffen entfernt werden. Die einzelnen Kartuschen lagen in Schubfächern vor und konnten durch die Öffnung einer Abdeckklappe entnommen werden, wie beispielhaft in Abbildung 59 dargestellt.

Abbildung 59: Schubfächer für Tonerkartuschen anhand DUT\_7 und DUT\_8



Schubfächer für Tonerkartuschen nach Entnahme der Tonerkartuschen (DUT\_7 links, DUT\_8 rechts)

Quelle: Eigene Darstellung, Technische Universität Berlin

### Öffnung des Gehäuses

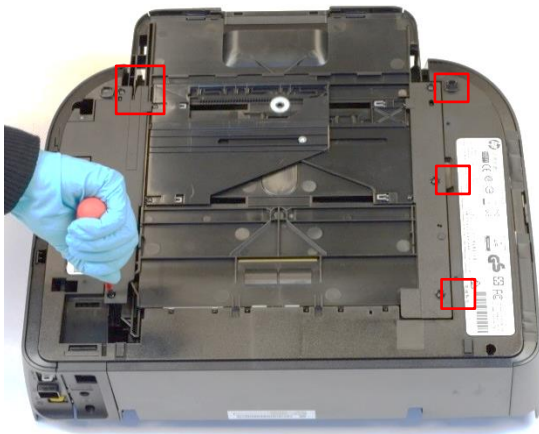
Nach der Entnahme der Kartuschen wurde das Gehäuse der Drucker geöffnet. Dieser Arbeitsschritt beinhaltete bei Multifunktionsdruckern zunächst die Trennung des Deckels (Abdeckung der Scannereinheit bzw. Vorrichtung zum Papiereinzug) von der Haupteinheit.

Die Öffnung der Gehäuse von DUT\_1, DUT\_2, DUT\_3 und DUT\_5 war mit geringem Aufwand durchführbar. Konstruktionsseitig wurden i.d.R. wenige, gut sichtbare Schrauben verwendet (Abbildung 60),

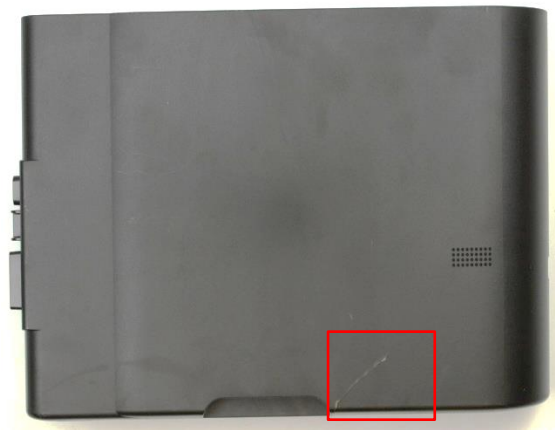
Kunststoffclips konnten mit geringem Aufwand gelöst werden, ohne dass destruktive Demontagemethoden angewandt werden mussten. Im Ergebnis ließen sich die größeren Kunststoffgehäuseteile vom Gerät separieren.

Im Kunststoffgehäuse von DUT\_4 waren im Gegensatz dazu eine hohe Anzahl verdeckter (nicht direkt sichtbar, da unter Bauteilen verdeckt) und schwer erreichbarer Kunststoffclips und Schrauben verbaut, welche den Demontageaufwand erheblich erhöhten. Infolgedessen mussten destruktive Demontage-techniken angewandt werden, was in der Folge zu Beschädigungen an verschiedenen Kunststoffelementen des Gehäuses führte (Abbildung 60).

Abbildung 60: Öffnung des Kunststoffgehäuses von DUT\_2 und DUT\_4



DUT\_2: Unterseite; gut sichtbare Schrauben



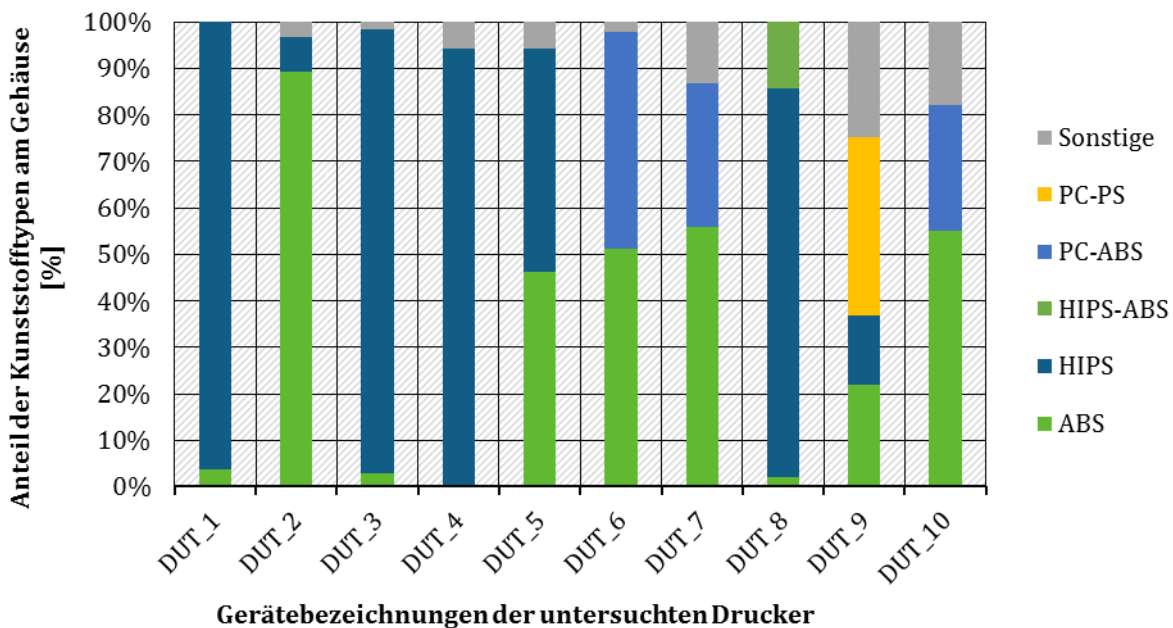
DUT\_4: Seitenelement des Gehäuses, Beschädigung durch die Notwendigkeit von destruktiven Demontage-techniken

Quelle: Eigene Darstellung, Technische Universität Berlin

Im Fall der Laserdrucker war die Öffnung der Gehäuse von DUT\_6, DUT\_8 und DUT\_10 mit geringem Aufwand durchführbar. Als Verbindungselemente wurden wenige, gut sichtbare Schrauben verwendet, Kunststoffclips konnten mit geringem Aufwand zerstörungsfrei gelöst werden. Die Öffnung der Kunststoffgehäuse von DUT\_7 und DUT\_9 war nur durch Anwendung von destruktiven Demontage-techniken möglich. Mehrere Schrauben von DUT\_9 konnten selbst mit Hilfe eines automatisierten Schraubendrehers nicht gelöst werden.

Abbildung 61 zeigt die Massenanteile der verschiedenen Kunststofftypen an Druckergehäusen laut der aufgetragenen Kunststoffkennzeichnung. Deutlich zu erkennen ist der Unterschied in der typischen Zusammensetzung der Kunststoffgehäuse zwischen den Gerätetypen. Bei Tintenstrahldruckern (DUT\_1-5) der untersuchten Stichprobe kommen mehrheitlich HIPS oder ABS zum Einsatz, bei Laserdruckern (DUT\_6-10) ist die Zusammensetzung deutlich inhomogener. Flammschutzmittel kamen laut Kunststoffkennzeichnung nur bei Laserdruckern zum Einsatz.

Abbildung 61: Massenanteile der Kunststofftypen an Druckergehäusen laut Kennzeichnung

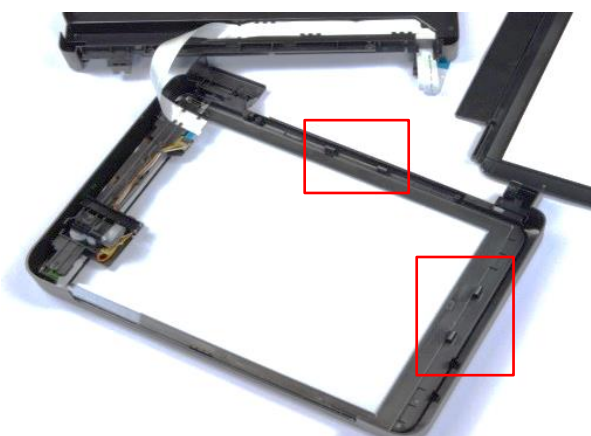


Quelle: Eigene Darstellung, Technische Universität Berlin

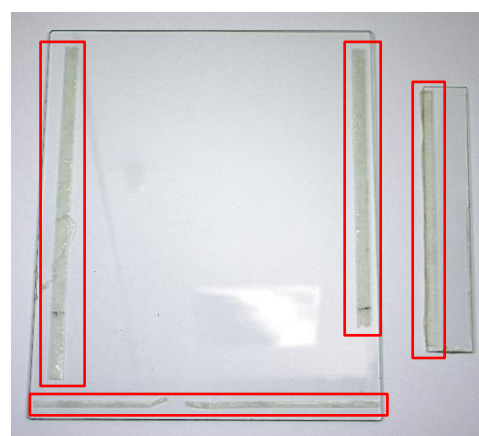
### Demontage der Scannereinheit bei Multifunktionsdruckern

Die Lichtquelle war bei den untersuchten Tintenstrahldruckern, die über eine Scannereinheit verfügten, jeweils LED-basiert (DUT\_1 bis DUT\_4). Um die Lichtquelle (Scannerlampe) und die Glasscheiben von DUT\_1 bis DUT\_4 separieren zu können, mussten zunächst die Kunststoffgehäuse der Scannereinheiten geöffnet werden. Im Fall von DUT\_1 war die Glasscheibe durch Kunststoffclips fixiert, wohingegen die Glasscheiben von DUT\_2, DUT\_3 und DUT\_4 mit Hilfe von Klebestreifen befestigt waren (Abbildung 62). In beiden Fällen ließen sich die Glasscheiben ohne großen Aufwand entnehmen.

Abbildung 62: Demontage der Scannereinheit von DUT\_1 und DUT\_4



DUT\_1: Kunststoffclips zur Befestigung der Glasscheibe in der Scannereinheit

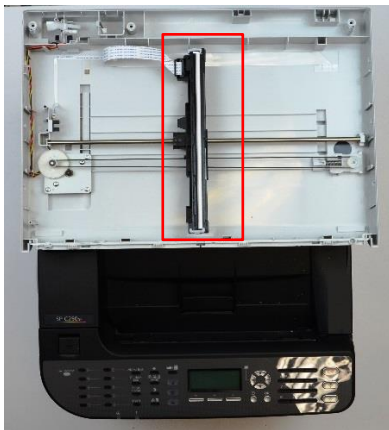


DUT\_4: Glasscheibe mit Resten der Klebestreifen zur Befestigung der Glasscheibe in der Scannereinheit

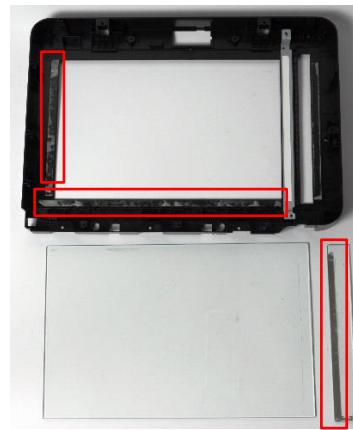
Quelle: Eigene Darstellung, Technische Universität Berlin

Unter den fünf untersuchten Laserdruckern zählen nur DUT\_8 und DUT\_9 zu den Multifunktionsgeräten mit einer Scannereinheit. Bei diesen mussten zunächst die Kunststoffgehäuse geöffnet werden, um die ebenfalls LED-basierte Lichtquelle (Abbildung 63) und die Glasscheibe zu demontieren. Bei DUT\_9 war die Glasscheibe durch Kunststoffclips sowie Klebestreifen fixiert, wohingegen die Glasscheiben von DUT\_8 nur mit Hilfe von Klebestreifen befestigt waren (Abbildung 63). In beiden Fällen ließ sich die Glasscheibe mit geringem Aufwand entnehmen. Dennoch war der Aufwand insgesamt hoch, da zunächst die Kunststoffgehäuse der Scannereinheiten demontiert werden mussten.

Abbildung 63: Demontage der Scannereinheit von DUT\_9 und DUT\_8



DUT\_9: Markiert ist die Scannereinheit



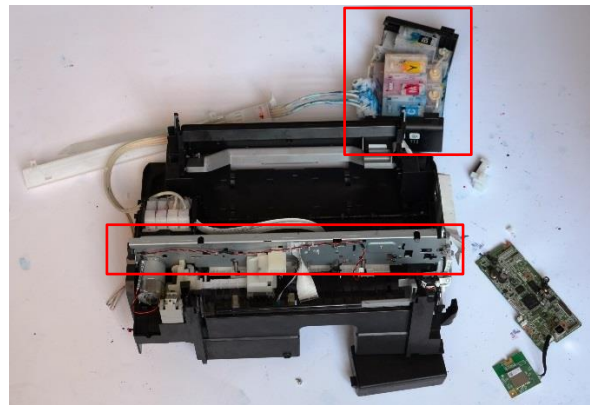
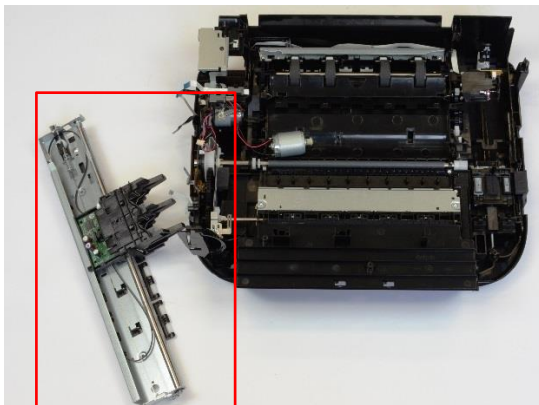
DUT\_8: Markiert sind die Klebeflächen mit denen die Glasplatte im Gerät befestigt ist

Quelle: Eigene Darstellung, Technische Universität Berlin

### Entnahme der bildgebenden Einheit

Die Entnahme der Druckkopfeinheit bei den untersuchten Tintenstrahldruckern war generell mit erheblichem Aufwand verbunden. Eine vermehrte Anzahl an Demontageschritten war erforderlich und hoher Zeitaufwand nötig, da die Druckkopfeinheit inklusive der Fixier- bzw. Führungsschiene zentral im Gerät angeordnet und mit einigen funktionellen Bauteilen verbunden ist (Abbildung 64). Besonders hervorzuheben ist abermals das Gerät DUT\_1, bei dem äußerst vorsichtig vorgegangen werden musste, da der Druckkopf mit dem integrierten Tintentanksystem über die die Farbe führenden Schläuche verbunden war. Während des Demontageprozesses lief demnach Farbe aus und kontaminierte infolgedessen die Arbeitsumgebung (Abbildung 64).

Abbildung 64: Entnahme der bildgebenden Einheit von DUT\_2 und DUT\_1



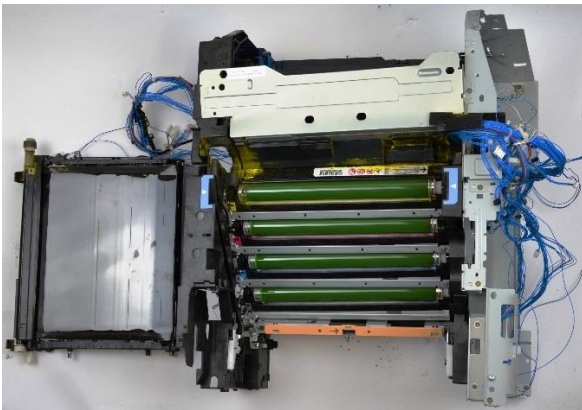
DUT\_2: Markiert ist der Druckkopf mit Führungsschiene

DUT\_1: Markiert ist der nachfüllbare Tintentank und die Führungsschiene

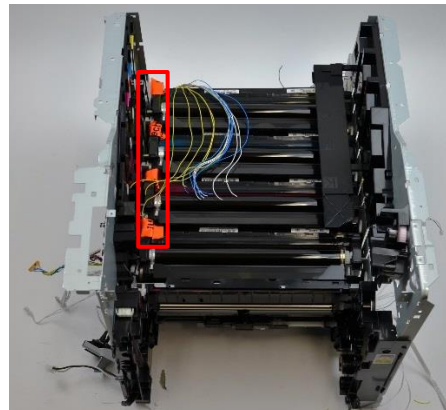
Quelle: Eigene Darstellung, Technische Universität Berlin

Im Fall der Laserdrucker gestaltete sich die Entnahme der Trommeleinheiten, inklusive der Entwicklerwalze und des Lasers, ähnlich komplex, wie bei den Tintenstrahldruckern die Entnahme der Druckköpfe (Abbildung 65). Zusätzlich traten aus allen untersuchten Laserdruckern während des Demontageprozesses erhebliche Mengen an Tonerpulver aus. Dieses rieselte mehrheitlich aus den seitlichen Öffnungen der Trommeln, die mit den Tonerkartuschen verbunden waren (Abbildung 65). Hierbei muss bedacht werden, dass dadurch bei der Demontage ein potentiell Gesundheits- bzw. Sicherheitsrisiko besteht.

Abbildung 65: Entnahme der bildgebenden Einheit von DUT\_7 und DUT\_10



DUT\_7: Ansicht von oben; zu sehen sind die vier einzelnen Trommeln (schwarz, blau, magenta, gelb);



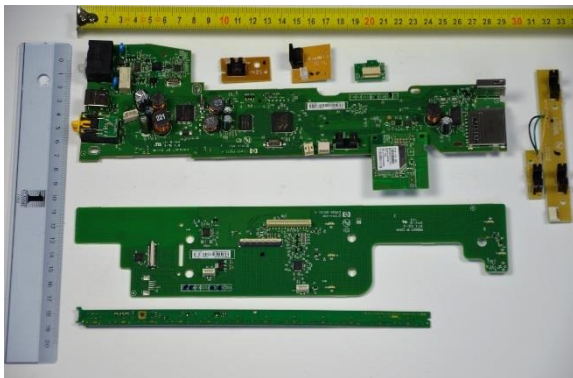
DUT\_10: Das markierte Feld umrandet orangene Klebänder, die zur Schließung der einzelnen Trommeln verwendet wurden, um den Austritt von Tonerpulver zu unterbinden

Quelle: Eigene Darstellung, Technische Universität Berlin

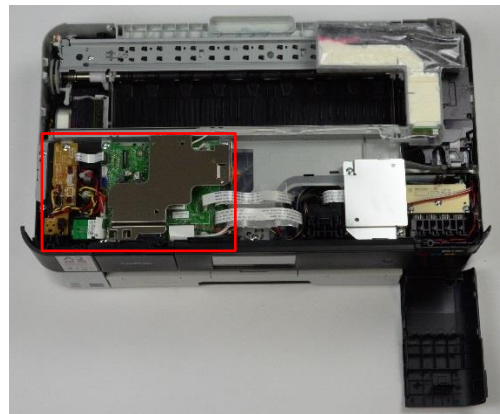
### Entnahme der Leiterplatten

In Relation zum Gesamtgewicht war in den untersuchten Tintenstrahldruckern eine relativ geringe Anzahl an bzw. Fläche von Leiterplatten verbaut (Abbildung 66). Die Entnahme aller Leiterplatten war zeitintensiv, da sie, genau wie die bildgebende Druckkopfeinheit, tief im Drucker verbaut waren (Abbildung 66). Bei allen untersuchten Tintenstrahldruckern waren die Leiterplatten in den Geräten an unterschiedlichen Positionen verteilt.

Abbildung 66: Entnahme der Leiterplatten von DUT\_2 und DUT\_3



DUT\_2: Alle Leiterplatten aus DUT\_2 und Maßstab

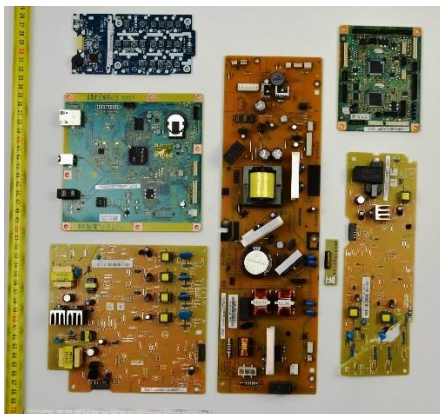


DUT\_3: Beispielhafte Darstellung der Position einer Leiterplatte im Gerät

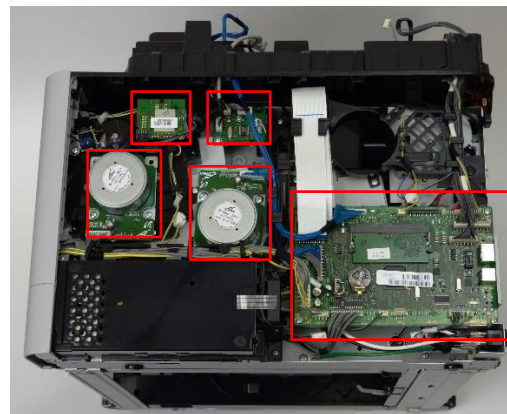
Quelle: Eigene Darstellung, Technische Universität Berlin

Bei den Laserdruckern sind, in Relation zum Gesamtgewicht der Geräte und im Vergleich mit Tintenstrahldruckern, mehr Leiterplatten (Masse und Fläche) verbaut. Die Entnahme der Leiterplatten war ebenfalls zeitintensiv, da sie zentral im Drucker verbaut waren (Abbildung 67).

Abbildung 67: Entnahme der Leiterplatten von DUT\_7 und DUT\_8



DUT\_7: Alle Leiterplatten aus DUT\_7 und Maßstab



DUT\_8: Seitenansicht; Position verschiedener Leiterplatten im Gerät

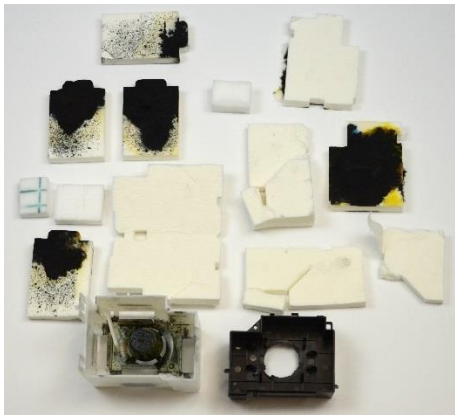
Quelle: Eigene Darstellung, Technische Universität Berlin

### Entnahme des Auffangbehälters

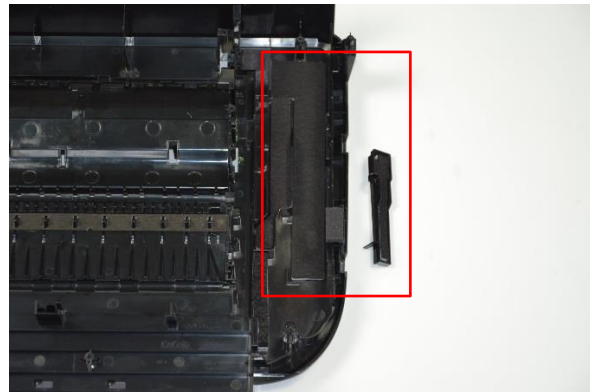
Laut einer Studie des Umweltbundesamts (Prakash et al. 2016) ist eine der häufigsten Ausfallursachen von Tintenstrahldruckern die erreichte Aufnahmekapazitätsgrenze des Tintenauffangbehälters. Dies ist eine Folge davon, dass die Düsen der Druckköpfe nach einer bestimmten Anzahl von Druckvorgängen gereinigt werden müssen. Dafür spült der Drucker eine geringe Menge Tinte durch die Druckköpfe, die im Anschluss in den Tintenauffangbehälter geleitet wird. Dieses Reservoir besteht aus einer Fasermatte, wie es am Beispiel des DUT\_4 in Abbildung 68 zu erkennen ist. Der eingebaute Tröpfchenzähler ist für die Überwachung der Aufnahmekapazität des Tintenauffangbehälters zuständig und sorgt dafür, dass sie nicht überschritten wird.

Der Austausch des Tintenauffangbehälters ist bei keinem der untersuchten Geräte ohne eine Demontage möglich. Bei jedem der untersuchten Geräte sind viele Demontageschritte erforderlich, um den Tintenauffangbehälter bzw. die einzelnen Fasermatten zu separieren. Ein großes Volumen der Fasermatten ist bei den Geräten DUT\_1, DUT\_3, DUT\_4 und DUT\_5 gegeben (Abbildung 68). Im Gegensatz dazu haben die Fasermatten bei DUT\_2 ein im Verhältnis geringes Volumen.

Abbildung 68: Entnahme des Auffangbehälters von DUT\_4 und DUT\_2



DUT\_4: Fasermatten (Tintenschwämmchenreservoir) aus einem Drucker



DUT\_2: Position des Tintenschwämmchenreservoirs im Drucker

Quelle: Eigene Darstellung, Technische Universität Berlin

Bei Laserdruckern wird das nach jedem Druckvorgang entstandene Resttonerpulver bei allen untersuchten Geräten in einen austauschbaren bzw. entleerfähigen Auffangbehälter geführt (Abbildung 69). Die Austauschbarkeit des Resttonerauffangbehälters war bei allen untersuchten Geräten gegeben. Teilweise war ein Deckel zum Verschluss des Behälters beigelegt (am Auffangbehälter befestigt). In jedem Fall war eine vorsichtige Entnahme notwendig, um ein Austreten des Tonerstaubes zu vermeiden.

Abbildung 69: Entnahme des Auffangbehälters von DUT\_8 und DUT\_10



DUT\_8: Auffangbehälter für Resttonerpulver



DUT\_10: Position des Auffangbehälters am Gerät

Quelle: Eigene Darstellung, Technische Universität Berlin

## Kennzeichnung von Kunststoffen

Die optische Erkennung von verarbeiteten Kunststoffarten bei Tintenstrahl- als auch Laserdruckern wird in den meisten Fällen durch eine eindeutige Kennzeichnung ermöglicht. Die größeren Kunststoffteile, wie z.B. die einzelnen Gehäuseelemente, sind in jedem Fall gekennzeichnet. Selbst kleine Teile aus Kunststoff, inklusive vieler Zahnräder, weisen zumeist eine Kennzeichnung auf.

### 3.7.6 Ergänzende Erkenntnisse

Es wird immer wieder berichtet, dass das Produktdesign von Tintenstrahldruckern das Wechseln der Tintenauffangbehälter nicht vorsieht (Prakash et al. 2016). Dies wurde auch bei den fünf Geräten der untersuchten Stichprobe festgestellt. Wenn der Hersteller ein Auswechseln der Behälter nicht im Design vorsieht, ist die Nutzungsphase des Gerätes potentiell begrenzt, da der Drucker seine Funktion nach einer bestimmten Anzahl an Druckkopfreinigungsvorgängen verliert. Da das Gerätereycling nicht oder nur bedingt betroffen ist, wurden keine weiteren Nachforschungen zur Häufigkeit des Geräteausfalls durch volle Tintenauffangbehälter angestellt.

Weiterhin stellt sich bei Tintenstrahldruckern in der Nutzungsphase die Frage, welche der am Markt erhältlichen Lösungen zu wechselbaren Tintenpatronen ökologisch vorteilhaft ist. Teilweise werden Tintenpatronen mit eingebautem Druckkopf verkauft (enthält Elektronik, inkl. Goldkontakte), teilweise sind Druckköpfe im Gerät integriert. Bei letzter Variante wird oft diskutiert, dass Druckköpfe nach längerer Nutzungspause eintrocknen können. Denkbar wäre auch, den Druckkopf separat von den Patronen aber leicht austauschbar zu gestalten (reparierbar). Diese Überlegungen wurden jedoch aufgrund der fehlenden Relevanz für das Gerätereycling nicht weiter vertieft.

### 3.7.7 Zusammenfassung

Es wird mit einem kontinuierlichen Rückgang des potentiellen Altgeräteaufkommens von Schreibtischdruckern für die Jahre 2020 und 2025 verglichen mit dem Jahr 2015 gerechnet. Für Schreibtischdrucker werden über den Zeitraum von 2015 bis 2020 leicht abnehmende Absatzzahlen für Deutschland prognostiziert. In den Jahren 2020 bis 2025 wird von gleichbleibenden Absatzzahlen ausgegangen.

Bei Betrachtung der Stoffmengen im potentiellen Altgeräteaufkommen (Tabelle 19) wird deutlich, dass der Fokus der zu stellenden Anforderungen bei Druckern vor allem auf dem vergleichsweise hohen Kunststoffanteil liegen sollte. Rund 95 Prozent der verbauten Kunststoffe in den untersuchten Geräten waren entweder ABS oder HIPS oder Polymerblends dieser Kunststoffe. Weiterhin ist Kupfer aus den Leiterplatten und Elektromotoren zu nennen. Neben den Edelmetallen ist im potentiellen Abfallaufkommen von Schreibtischdrucker gegebenenfalls Neodym aus Elektromotoren für das stoffliche Recycling relevant.

Bei Tintenstrahldruckern stellen große Elemente aus Kunststoff mit 37 Prozent (Summe Gehäuse und Innenrahmen, ohne Kartuschen und weitere Kunststoffteile) einen erheblichen Masseanteil dar. Auf Leiterplatten entfallen lediglich 2 Prozent der Gesamtmasse. Bei Laserdruckern haben Metalle einen erheblich höheren Masseanteil. Insbesondere die Stabilisierungselemente aus Eisenmetall stellen mit 23 Prozent einen erheblichen Anteil. Die Leiterplatten haben mit 5 Prozent einen höheren Masseanteil als bei Tintenstrahldruckern.

Eine wesentliche Erkenntnis bei der Identifizierung von Kunststofftypen ist, dass bei Gehäuseelementen von Tintenstrahldruckern oftmals nur HIPS, nur ABS, oder teils HIPS und ABS eingesetzt werden. Weiterhin werden in den Gehäuseteilen der untersuchten Stichprobe laut Kennzeichnung keine Flammenschutzmittel eingesetzt. Bei Laserdruckern war die Vielfalt der eingesetzten Kunststofftypen deutlich höher. Ebenfalls werden bei Laserdruckern i.d.R. Flammenschutzmittel zugesetzt.

Bedingt insbesondere durch die beweglichen Komponenten zur Papierführung durch das Gerät und zur Steuerung der bildgebenden Einheiten sind Drucker im Vergleich zu den anderen untersuchten

Produktgruppen deutlich komplexer im internen Aufbau. Die Demontage der zehn Geräte verdeutlichte, dass eine allgemeingültige Abfolge von Demontageschritten nicht definiert werden kann. Aufgrund der großen Anzahl unterschiedlicher Produktmerkmale und -funktionen variiert der Aufbau von Druckern und der dazugehörigen Komponenten weitaus mehr als beispielsweise bei den untersuchten Notebooks.

Die untersuchten Tintenstrahldrucker waren eindeutig nicht für den Austausch der Tintenauffangbehälter bzw. Fasermatten konzipiert. Bei allen Modellen mussten zunächst Gehäuseelemente entfernt werden, die mit teils schlecht einsehbaren Schrauben und Clips zusammengehalten wurden. Bei den Modellen DUT\_1 und DUT\_5 konnten die Fasermatten von der Kunststoffummantelung getrennt und somit potentiell entnommen bzw. ausgetauscht werden. Die Fasermatten von DUT\_2 waren mit einem Gehäuseelement verklebt und somit nur mit erheblichem Aufwand separierbar. Wie in Kapitel 3.7.3 beschrieben, ist die Separierbarkeit der Tintenauffangbehälter für die Erstbehandlungsanlagen nicht von Interesse, da sich etwaig enthaltene Tintenreste dissipativ auf große Stoffströme in der mechanischen Zerkleinerung verteilen.

### **3.8 Zusammenfassende Bewertung**

Die Bedeutung der untersuchten Produktgruppen im Recyclingprozess hinsichtlich der potentiell verwertbaren Werkstoffe lässt sich anhand des in Kapitel 3.1.2 abgeschätzten potentiellen Altgeräteaufkommens in Verbindung mit den zu Grunde gelegten Materialkonzentrationen für derzeit oder potentiell recyclingrelevante Materialien bewerten. Für die untersuchten Produktgruppen kann Flachbildschirmfernsehern, gefolgt von Notebooks und Smartphones, das größte Recyclingpotential für Edelmetalle (außer Kobalt) zugeschrieben werden. Unter Berücksichtigung der zu erwartenden Zunahmen im potentiellen Altgeräteaufkommen von Flachbildschirmfernsehern und Smartphones ist mit einer wachsenden Bedeutung dieser Produktgruppen im Recyclingprozess zu rechnen. Kobalt wird, bezüglich der in diesem Forschungsvorhaben ausgewählten Fallstudien, überwiegend für die Kathodenherstellung von Gerätebatterien verwendet. Entsprechend bieten für das Kobaltrecycling für Notebooks gefolgt von Smartphones das größte Massentpotential zum stofflichem Recycling unter den untersuchten Produktgruppen.

Für das Recycling von Kunststoffen sind bei den betrachteten Fallstudien insbesondere Flachbildschirmfernseher und Schreibtischdrucker von Bedeutung. Die hohen Tonnagen an verbauten Kunststoffgehäusen bei vergleichsweise geringer Materialvielfalt verstärken diese Einschätzung. In den untersuchten Notebooks sind im Vergleich zu Schreibtischdruckern ähnliche Mengen an Kunststoff im Recyclingaufkommen zu erwarten. Diese können jedoch auf Grund von Metallbeschichtungen, Metallinschlüssen, verwendeten Flammenschutzmitteln sowie aufgetragenen Beschichtungen nach aktuellem Stand vielfach nicht stofflich recycelt werden.

## 4 Teil II: Entnehmbarkeit und Lebensdauer von Geräteakkumulatoren

### 4.1 Einführung und Zielstellung

In vielen Elektronikgeräten stellt der Akkumulator eine der Schlüsselkomponenten im Hinblick auf die Umweltauswirkungen dar. Aufgrund der im Vergleich zum Gesamtprodukt oftmals stärker begrenzten Lebensdauer von Akkulatoren kann die Gesamtwelbilanz bei einer angestrebten Nutzungslängerung maßgeblich durch diese beeinflusst werden. Damit das Ende der Lebensdauer eines Akkulators nicht zwangsläufig zur frühzeitigen Beendigung der Nutzungsphase des Endgerätes führt, ist es vorteilhaft, Akkulatoren austauschen zu können. Dies ermöglicht potentiell eine längere Nutzungsdauer der Endgeräte und dient somit der Umwelt- und Ressourcenschonung. Des Weiteren muss eine problemlose Entnehmbarkeit von Batterien und Akkulatoren aus Altgeräten gewährleistet sein, damit die gesetzlich vorgeschriebene Separierung vom Altgerät (ElektroG) am Ende der Nutzungsphase durch eine Erstbehandlungsanlage qualitativ hochwertig vorgenommen werden kann.

In diesem Kapitel werden Fragestellungen mit Bezug zu Akkulatoren in EEG anhand von vier Fallstudien vertieft. Dabei geht es nicht nur um Fragen zu Entsorgung und Recycling, sondern ebenfalls um Aspekte der Nutzungsphase, wie der Lebensdauer. Im Ergebnis werden Vorschläge für erweiterte Anforderungen an Produkte im Rahmen der Ökodesign-Richtlinie erarbeitet (Kapitel 5.9). Die folgenden vier Produktgruppen wurden im Forschungsvorhaben als Fallstudien ausgewählt:

- ▶ Notebooks
- ▶ Smartphones
- ▶ E-Book-Reader
- ▶ Elektrische Zahnbürsten

Weiterhin wird eine Bestandsaufnahme erstellt, bei welchen Produktgruppen die Entnehmbarkeit durch den Endnutzer grundsätzlich möglich ist, bei welchen die Entnahme aus bestimmten Gründen durch einen Fachservice notwendig bzw. sinnvoll ist und welche Ausnahmen von der Pflicht der Entnehmbarkeit notwendig sind.

### 4.2 Ausgangslage

Die Entnehmbarkeit von Batterien und Akkulatoren ist europarechtlich durch die Batterierichtlinie<sup>15</sup> geregelt. Artikel 11 der Batterierichtlinie zufolge stellen die EU Mitgliedsstaaten sicher, dass „die Hersteller die Geräte so entwerfen, dass Altbatterien und –akkumulatoren problemlos entnommen werden können“. Die im Jahr 2013 vorgenommene Änderung der Batterierichtlinie<sup>16</sup> präzisiert die Vorgaben bezogen auf den Adressaten und fügt die Formulierung hinzu, dass wenn die Altbatterien und -akkus nicht vom Endnutzer problemlos entnommen werden können, diese „von qualifizierten Fachleuten, die vom Hersteller unabhängig sind, problemlos entnommen werden können“. Diese Vorgabe ist in § 4 Abs. 1 Satz 2 ElektroG wie folgt umgesetzt: „Elektro- und Elektronikgeräte, die vollständig oder teilweise mit Batterien oder Akkulatoren betrieben werden können, sind möglichst so zu gestalten, dass Altbatterien und Altakkumulatoren durch Endnutzer problemlos entnommen werden können. Sind Altbatterien

---

<sup>15</sup> Richtlinie 2006/66/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 6. September 2006 über Batterien und Akkulatoren sowie Altbatterien und Altakkumulatoren und zur Aufhebung der Richtlinie 91/157/EWG, 2006

<sup>16</sup> Richtlinie 2013/56/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 20. November 2013 zur Änderung der Richtlinie 2006/66/EG des Europäischen Parlaments und des Rates über Batterien und Akkulatoren sowie Altbatterien und Altakkumulatoren hinsichtlich des Inverkehrbringens von Cadmium enthaltenden Gerätebatterien und -akkumulatoren, die zur Verwendung in schnurlosen Elektrowerkzeugen bestimmt sind, und von Knopfzellen mit geringem Quecksilbergehalt sowie zur Aufhebung der Entscheidung 2009/603/EG der Kommission, 2013

oder Altakkumulatoren nicht problemlos durch den Endnutzer entnehmbar, sind die Elektro- und Elektronikgeräte so zu gestalten, dass die Altbatterien und Altakkumulatoren problemlos durch vom Hersteller unabhängiges Fachpersonal entnommen werden können“. Darüber hinaus müssen Hersteller den Elektro- und Elektronikgeräten, welche eine Batterie oder einen Akkumulator enthalten, Informationen für den Nutzer bezüglich des Typs, chemischen Systems und die sichere Entnahme aus dem Gerät beifügen (vgl. § 28 Abs. 2 ElektroG).

Es ist festzustellen, dass der Begriff der problemlosen Entnehmbarkeit in den relevanten gesetzlichen Regelwerken nicht näher definiert ist. Ohne nähere Definition kann er u.a. so verstanden werden, dass die Entnahme manuell, zerstörungsfrei und ohne Zuhilfenahme von Spezialwerkzeugen – mit geringem Zeitaufwand – erfolgen kann (Bartnik et al. 2013). Eine Studie des Fraunhofer IZM (Schischke, Karsten et al. 2014) zeigte anhand von Tablet-PCs die Demontagefreundlichkeit mobiler IKT Geräte exemplarisch auf. Im Ergebnis zeigte sich, dass hinsichtlich des zu leistenden Aufwands, um den Akku entnehmen zu können, je nach Hersteller und Modell große Unterschiede bestehen. Diese liegen begründet in der Komplexität des Aufbaus der Geräte, mit welcher die damit notwendige Anzahl der Arbeitsschritte um Verbindungen zu lösen und an bestimmte Bauteile zu gelangen deutlich schwankt. In einem aus Sicht der Entnehmbarkeit besonders negativ zu bewertenden Beispiel ist der Anschluss des Akkus fest mit dem Gerät verlötet. Bei anderen Modellen ist der Akku verklebt oder nur mit Spezialwerkzeugen erreichbar.

Es können prinzipiell drei Fälle unterschieden werden:

- ▶ Akkumulator ist ohne Werkzeug entnehmbar
- ▶ Akkumulator ist nur mit Werkzeug entnehmbar
- ▶ Akkumulator ist nur durch Fachpersonal entnehmbar (Wärmezufuhr, Löten erforderlich)

#### 4.2.1 Lithium-Ionen-Akkumulatoren

Die Markteinführung von Lithium-Ionen (Li-Ion) Akkumulatoren mit Lithiumkobaltoxidkathode (LCO) erfolgte im Jahr 1991. Die Lithium-Ionen Technik in den Gerätebatterien der Informations- und Kommunikationstechnik (IKT) hat sich seitdem immer weiter durchgesetzt. In mobilen IKT Geräten haben Li-Ion-Akkumulatoren andere Zellchemien, wie die Nickelmetallhydridtechnik (NiMH), nahezu vollständig vom Markt verdrängt. Allerdings werden NiMH Akkumulatoren in anderen elektronischen Geräten, wie beispielsweise elektrischen Zahnbürsten, noch immer in nennenswertem Umfang eingesetzt. Beide Batterietypen wandeln elektrische Energie reversibel in chemische Energie um und stellen diese dem Nutzer bei Bedarf wieder als elektrische Energie zur Verfügung. Der Fokus liegt im Folgenden hauptsächlich auf der Li-Ion-Technik.

Lithiumionenbatterien sind galvanische Zellen, die Lithium als Ladungsträger für die Umwandlung von elektrischer in chemische Energie nutzen. Die derzeit am Markt erhältlichen Sekundärzellen mit Lithiumionentechnik nutzen die Interkalation von Lithium in den Elektroden um diesen Prozess reversibel ablaufen zu lassen. Für die Interkalation von Lithium in der Anode wird üblicherweise Kohlenstoff in Form von Graphit eingesetzt. Für die Kathode haben sich im IKT-Bereich Metallschichtoxide mit Übergangsmetallen als Elektrodenmaterial durchgesetzt. Die unterschiedlichen Zellchemien der Lithiumionenbatterien können unter anderem über die Kathodenmaterialien voneinander abgegrenzt werden. Diese unterscheiden sich anhand unterschiedlicher Energiedichte, Kosten zur Herstellung, Lebensdauer, und anderen Faktoren. Im Bereich mobiler IKT Geräte sind insbesondere Lithiumkobaltdioxid- (LCO), Lithium-Nickel-Mangan-Kobalt-Oxid- (NMC) und Lithium-Nickel-Kobalt-Aluminium- (NCA) Akkumulatoren mengenrelevant. Für die Gerätebatterien in Smartphones werden laut einer Studie von Roland Berger ausschließlich LCO- und NMC-Kathoden verwendet (Roland Berger 2012). Die Gerätebatterien von Notebooks wurden, mit einem Marktanteil von knapp 50 Prozent im Jahre 2011, von Zellen mit NMC-Kathoden dominiert. Laut der Prognose wird sich der Marktanteil von NMC-Kathoden in Notebooks bis zum Jahre 2020 auf rund 60 Prozent erhöhen. Gerätebatterien mit LCO-

Kathode hatten im Jahr 2011 einen Marktanteil von rund 35 Prozent, Gerätebatterien mit NCA-Kathode einen Marktanteil von knapp 20 Prozent. Laut der Prognosen verringert sich der Marktanteil beider Batterietypen bis zum Jahr 2020 auf rund 15 Prozent (NCA) und rund 25 Prozent (LCO). In Smartphones dominierten im Jahr 2011 mit 91 Prozent Marktanteil Gerätebatterien mit LCO-Kathode. Dieser Wert wird bis zum Jahr 2020 auf 83 Prozent zurückgehen, Gerätebatterien mit NMC-Kathode können ihren Marktanteil bei den Smartphones entsprechend potentiell auf 17 Prozent nahezu verdoppeln (Roland Berger 2012).

#### 4.2.2 Lebensdauer von Li-Ion-Akkumulatoren

Physikalische und chemische Prozesse führen bei Li-Ion-Akkumulatoren kontinuierlich zu einer Abnahme der nutzbaren Kapazität. Diese Abnahme der nutzbaren Kapazität, auch Degradation oder Alterung genannt, lässt sich in kalendarische und zyklische Alterung unterteilen. Bei der kalendarischen Alterung führen chemische Prozesse innerhalb der Zelle zu einer kontinuierlichen Verringerung der Zellkapazität, auch wenn diese weder geladen noch entladen wird. Die zyklische Alterung beschreibt den Kapazitätsverlust einer Zelle, der durch den Lade- und/oder den Entladeprozess verursacht wird. Neben der Zellchemie beeinflussen drei zentrale Einflussfaktoren die Zellalterung von Lithiumionenbatterien: die Temperatur, der Ladezustand (State of Charge, SoC) und die Ladegeschwindigkeit (C-Rate).

In Tabelle 22 werden diese Einflussfaktoren für die in dieser Arbeit betrachteten Lithiumionenakkumulatoren qualitativ hinsichtlich ihres Einflusses auf die kalendarische und zyklische Alterung bewertet. Ein Pluszeichen zeigt eine Verstärkung und ein Minuszeichen eine Verminderung des Alterungseffektes an. Erhöhte Temperaturen und hohe Ladezustände beschleunigen sowohl die kalendarische, als auch die zyklische Alterung. Niedrige Temperaturen und niedrige Ladezustände verringern die kalendarische erhöhen aber potentiell die zyklische Alterung während des Ladeprozesses. Hohe Ladegeschwindigkeiten (C-Rate) verstärken die zyklische Alterung, niedrige C-Raten verringern diese.

Tabelle 22: Einflussfaktoren und ihr qualitativer Einfluss auf die kalendarische und zyklische Alterung von Lithiumionenbatterien mit LCO-, NMC- und NCA-Kathode nach (Dethlefs 2017)

	Temperatur		SoC		C-Rate	
	hoch	tief	hoch	tief	hoch	tief
Kalendarische Alterung	+	-	+	-		
Zyklische Alterung	+	+	+	+	+	-

SoC: State-of-charge, Ladezustand; C-Rate: Lade- bzw. Entladestrom bezogen auf die Kapazität einer Zelle

#### 4.2.3 Kennzeichnung von Geräteakkumulatoren

Das ElektroG enthält die Maßgabe, dass Hersteller von EEG, die Batterien oder Akkumulatoren enthalten, diesen Angaben beifügen, welche den Endnutzer über den Typ und das chemische System der Batterie oder des Akkumulators und über deren sichere Entnahme informieren. Darüber hinaus gibt es für Kleinbatterien und Akkumulatoren, wie solche, die in der Regel in IKT Geräten eingesetzt werden, keine einheitliche Kennzeichnungspflicht, die Rückschlüsse auf die enthaltenen Ressourcen schließen lässt. Die Batterierichtlinie schreibt lediglich die Kennzeichnung für eine getrennte Sammlung vor. In anderen Regionen der Welt sind unterschiedliche Recyclingsymbole als Kennzeichnung verpflichtend (z.B. Möbius-Recycling-Symbol). Keine der Kennzeichnungen enthält jedoch Informationen zum Gehalt an Ressourcen. Batteriehersteller bringen in der Praxis häufig neben den gesetzlich vorgeschriebenen Kennzeichnungen noch weitere Informationen auf die Zellen auf, insbesondere zum chemischen System (z.B. Li-Ion, NiMH). Wie in Abbildung 70 dargestellt, erfolgt dies jedoch nicht einheitlich.

Abbildung 70: Beispiele für die Kennzeichnung von Akkumulatoren in der Praxis



Quelle: unveröffentlichte Daten von (Schischke et al. 2014)

Vor dem Hintergrund von Sicherheitsproblemen in Recyclingunternehmen erstellte VDI einen Entwurf zur Kennzeichnung von Batterien und Akkumulatoren: „IEC 62902 ED1: Secondary batteries: Marking symbols for identification of their chemistry“. Der Gültigkeitsbereich schließt jedoch nur Industriebatterien ab einem Volumen von 900 cm<sup>3</sup> ein. Für die im Forschungsvorhaben betrachteten kleinen Gerätebatterien und -akkumulatoren gilt der Standard daher nicht.

Abbildung 71: Batteriekennzeichnung nach IEC Standard 62902 ED1 Entwurfssfassung Stand März 2017



Quelle: IEC Standard 62902 ED1 Entwurfssfassung Stand März 2017

### 4.3 Bestandsaufnahme zur Entnehmbarkeit

Erstbehandlungsanlagen aus dem Begleitkreis berichteten von einer zunehmenden Anzahl und mangelnden Identifizierbarkeit von Geräten mit integrierten Akkumulatoren. Beispiele für betroffene Gerätetypen sind unter anderem kabellose Kopf- und Ohrhörer, mobile Bluetooth Lautsprecher, Smartwatches, Fitnessstracker, Action Cams, elektrische Rasierapparate und elektrische Zahnbürsten.

Wie eingangs rezitiert, enthält § 4 ElektroG die Maßgabe, dass Hersteller Geräte so entwerfen müssen, dass Altbatterien und -akkumulatoren vom Nutzer oder qualifizierten Fachleuten, die vom Hersteller unabhängig sind, problemlos entnommen werden können. Dies gilt jedoch nicht, wenn aus Gründen der Sicherheit, der Leistung, aus medizinischen Gründen, der Vollständigkeit von Daten eine ununterbrochene Stromversorgung notwendig und eine ständige Verbindung zwischen dem Gerät und der

Batterie oder dem Akkumulator erforderlich ist. Es kann festgestellt werden, dass eine exakte Auslegung der Begriffe aus rechtlicher Sicht zum aktuellen Zeitpunkt nicht gegeben ist.

Das Ziel dieses Arbeitsschrittes war das Erstellen einer Bestandsaufnahme, bei welchen Produktgruppen eine Entnehmbarkeit durch den Endnutzer grundsätzlich möglich ist und bei welchen Produktgruppen und aus welchen Gründen die Entnahme durch einen Fachservice grundsätzlich notwendig bzw. sinnvoll ist. Des Weiteren wird eine Übersicht der notwendigen Ausnahmen von der Pflicht zur Entnehmbarkeit entsprechend den in der Batterie-Richtlinie genannten Gründen erstellt.

Als Grundlage zur Erarbeitung einer Übersicht und einer anschließenden Bewertung aller batteriebetriebenen Produktgruppen wurde auf die Systematik eines laufenden EU-Projektes<sup>17</sup> (ProSUM<sup>18</sup> - Prospecting Secondary raw materials in the Urban mine and Mining wastes) zurückgegriffen. Sie bildet dabei die Basis, indem es sämtliche abfallrelevanten Elektro(nik)geräte auflistet und in Kategorien (UNU-Keys) und Subkategorien (Subkeys) unterteilt (C.P. Balde 2015). Die Datenbank bestand zum Zeitpunkt der Durchführung dieses Arbeitsschrittes aus 54 Kategorien, 196 Subkategorien und 696 Produktbezeichnungen. Von diesen können 169 Produkte prinzipiell mit Batterie bzw. Akku betrieben werden (eigene Recherche).

Die Produkte in der Datenbank wurden nach folgenden Produkteigenschaften kategorisiert:

Kriterium	Eigenschaft	Anzahl der Produkte
Überwiegender Betriebsmodus	1 - Netzbetrieb	30
	2 - Mischnutzung	33
	3 - Akkubetrieb	77
	4 - mehrere zutreffend	12
	5 - Unbekannt	17

Wenn 2, 3, 4 zutreffend (insgesamt 122 Produkte), dann:

Ist der Akku fest verbaut?	1 - Selten	84
	2 - Teilweise	10
	3 - Überwiegend	13
	4 - unbekannt	15

Die Produkte, bei denen der Akku teilweise oder überwiegend fest verbaut ist (Einschätzung der Autoren), sind im Folgenden aufgelistet:

Geräte, bei denen der Akku teilweise fest verbaut wird:

- ▶ Notebooks
- ▶ Palm Tops
- ▶ Schnurlose Telefone
- ▶ Babyphone
- ▶ Mobiltelefone
- ▶ Smartphones
- ▶ Ohrenschutz mit Funkverbindung
- ▶ Tragbare Lautsprecher
- ▶ Akkuschauber

Geräte, bei denen der Akku überwiegend fest verbaut wird:

<sup>17</sup> Die Informationen stammen aus einem projektinternen Dokument aus dem Konsortium.

<sup>18</sup> Webseite des EU-Projektes ProSUM <http://www.prosumproject.eu/>

- ▶ Elektrische Zigaretten
- ▶ Tragbare Staubsauger
- ▶ Elektrische Zahnbürsten
- ▶ Tablet-PCs
- ▶ Kopfhörer
- ▶ MP3 Player
- ▶ Portable Navigationssysteme
- ▶ Navigationssysteme mit Display
- ▶ E-Book Reader
- ▶ Bluetooth Headsets
- ▶ Solar Lichter
- ▶ Tragbare Videospielekonsolen

Im Weiteren wurde die Liste mit Geräten, die prinzipiell durch Batterien und Akkumulatoren betrieben werden können (169 Produkte) daraufhin untersucht, in welchen Fällen prinzipiell eine der Aspekte aus ElektroG §4 Absatz 3 zutrifft, die eine Ausnahme zur problemlosen Entnehmbarkeit rechtfertigen könnten. Problematisch ist hier das Fehlen einer genauen Definition der Begriffe. So wurde festgestellt, dass bei 101 der 169 Geräte, je nach Auslegung der Begriffe „Sicherheit“ und „Leistung“, potentiell eine Ausnahme beansprucht werden könnte. Von den 101 Geräten sind 53 Profiwerkzeuge. Die verbleibenden 48 Geräte sind divers zusammengesetzt und beinhalten zum einen Hygieneartikel wie elektrische Zahnbürsten und Rasierapparate als auch IKT Geräte wie Notebooks, Tablets und Smartphones.

In allen Fällen kann prinzipiell argumentiert werden, dass Geräte besonders vor dem Eindringen von Fremdkörpern und Flüssigkeiten geschützt werden müssen und daher aus sicherheitsrelevanten Gründen Geräteakkus zu integrieren sind. Es wird daher vorgeschlagen, zu prüfen, inwieweit das Zutreffen einer Ausnahme durch den Hersteller nachgewiesen werden muss. Dies kann beispielsweise erfolgen, indem der faktische Schutz vor dem Eindringen von Fremdkörpern und Flüssigkeiten durch die Produktgestaltung an eine IP Zertifizierung gekoppelt wird. Eine Ausnahme von der generellen Pflicht der Entnehmbarkeit von Geräteakkus kann durch den Hersteller also nur dann beansprucht werden, wenn das entsprechende Gerät eine IP Zertifizierung nachweisen kann. Ein Mindestkriterium müsste entsprechend festgelegt werden (bspw. mindestens IP5X oder IPX6). Der Vorteil eines solchen Vorgehens wäre, dass die Ausnahmeregelung an ein Kriterium gekoppelt wird, dass durch eine internationale Norm geregelt ist.

Die IP-Zertifizierung kann nicht alle in der Batterierichtlinie benannten Begründungen für Ausnahmen abdecken, sondern betrifft nur eine Teilmenge aus dem Bereich „Sicherheit“ und ggf. „Leistung“. „Medizinische Gründe“ sowie „Gründe der Vollständigkeit von Daten“ können nicht an einer IP Zertifizierung festgemacht werden. Auch hier bedarf es genauerer Definitionen und Kriterien.

So zeigt sich in der Praxis, dass beispielsweise die Hersteller von Smartphones vermehrt auf festverbaute Gerätebatterien setzen und dieses Vorgehen unter anderem mit der Verbrauchersicherheit begründen. Die Autoren gehen davon aus, dass sich für Geräte, speziell mit Lithiumionenbatterien, in nahezu jedem Fall Ausnahmen mit sicherheitstechnischen Bedenken begründen lassen. Dieser Effekt wird aus Sicht der Autoren durch die unscharf definierten Ausnahmefälle § 4 Absatz 3 begünstigt.

## 4.4 Fallstudie 1: Notebooks

### 4.4.1 Bestehende Anforderungen

#### Gesetzliche Anforderungen

Die Durchführungsmaßnahme zur umweltgerechten Gestaltung von Computern und Computerservern (VO 617/2013/EU)<sup>19</sup> unter der Ökodesign-RL stellt die folgenden Anforderungen an Notebooks, die den Akkumulator betreffen:

Informationspflichten der Hersteller ab dem 1. Juli 2014:

7.1.1. *„Die Hersteller müssen folgende Informationen in den technischen Unterlagen angeben und auf frei zugänglichen Websites veröffentlichen: [...] die erreichbare Mindestanzahl der Ladezyklen eines Akkus (nur bei Notebook-Computern)“*

Sowie

7.2. *„Wird ein Notebook-Computer mit einem oder mehreren Akkus betrieben, auf die nicht berufsmäßige Benutzer keinen Zugriff haben und die von ihnen nicht ausgetauscht werden können, müssen Hersteller zusätzlich zu den in Abschnitt 7.1 genannten Informationen folgende Angabe in den technischen Unterlagen machen, auf frei zugänglichen Websites veröffentlichen und auf der Außenverpackung des Notebook-Computers anbringen: „Der Akku/die Akkus dieses Produkts kann/können nicht ohne weiteres vom Benutzer selbst ausgetauscht werden.“*

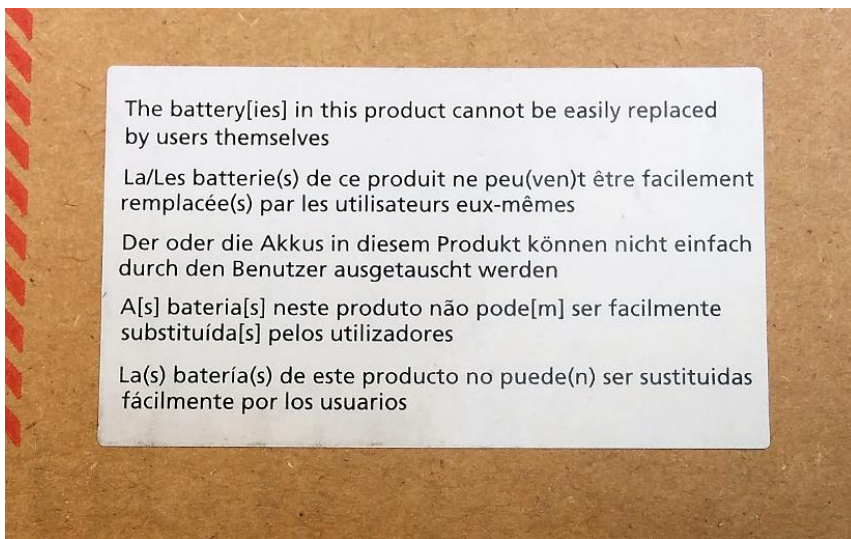
*Die auf der Außenverpackung des Notebook-Computers angebrachten Angaben müssen gut sicht- und lesbar und in den Amtssprachen des Landes verfasst sein, in dem das Produkt vermarktet wird.“*

Abbildung 72 zeigt ein Beispiel für die Umsetzung. Es liegen dem Forschungsvorhaben keine Daten vor, anhand derer beurteilt werden kann, inwiefern diese Information den Käufer erreicht. Es kann angenommen werden, dass die Information zur Austauschbarkeit des Akkus auf der Verpackung von Notebooks dem Konsumenten erst am Ende des Entscheidungs- bzw. Kaufprozesses verfügbar wird. Selbstverständlich gibt es andere Wege, auf dem sich der potenzielle Käufer zur Austauschbarkeit des Akkus informieren kann. Eine alternative Vorgehensweise wäre es, einen entsprechenden Hinweis verpflichtend an der Verkaufsstelle anzubringen, beispielsweise als Ergänzung der Energieverbrauchs-kennzeichnung (bislang besteht im Bereich Notebooks und Computer jedoch noch keine Pflicht für die Energieverbrauchs-kennzeichnung).

---

<sup>19</sup> Verordnung (EU) Nr. 617/2013 der Kommission vom 26. Juni 2013 zur Durchführung der Richtlinie 2009/125/EG des Europäischen Parlaments und des Rates im Hinblick auf die Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung von Computern und Computerservern (ABl. L 175 v. 27.6.2013, S. 13).

Abbildung 72: Umsetzungsbeispiel der Informationsanforderung des Herstellers, die fehlende Entnehmbarkeit durch den Nutzer auf der Verpackung von Notebooks zu kennzeichnen



Quelle: Eigene Darstellung, Technische Universität Berlin

## Umweltzeichen

Im Folgenden werden die in Kapitel 3.2.1 und 3.2.2 eingeführten gesetzlichen Anforderungen und Umweltzeichen hinsichtlich ihrer Designanforderungen für Notebookbatterien diskutiert. Im Fokus stehen die vom Blauen Engel für Computer und Tastaturen (RAL-UZ 78 2017) definierten Anforderungen an Gerätebatterien, die punktuell durch ergänzende und weiterführende Anforderungen der anderen Umweltzeichen ergänzt werden.

Der Blaue Engel definiert für batteriebetriebene Computer verschiedene Anforderungen hinsichtlich der Demontagefähigkeit, der Informationsbereitstellung und der Lebensdauer der verbauten Gerätebatterien.

An die Auswechselbarkeit stellt der Blaue Engel die folgende Anforderung: „Die Computer müssen so konstruiert sein, dass die Akkus einfach und ohne besondere Fachkenntnisse ausgetauscht werden können.“

Das European Ecolabel geht bei den Demontageanforderungen einen ähnlichen Weg. Auch hier soll die Gerätebatterie mit Hilfe von „handelsüblichen gängigen“ Hand- oder Elektrowerkzeugen ausgebaut werden können. Das European Ecolabel stellt hierzu einige Beispielwerkzeuge vor, die als handelsübliches gängiges Hand- oder Elektrowerkzeug gelten. Die genannten Beispiele umfassen Zangen, Schraubendreher, Schneidmesser und Hämmer nach ISO 5742, ISO 1174 und ISO 15601.

Zur Haltbarkeit des Akkumulators fordert der Blaue Engel: „Der Akku muss mindestens einen Wert von 500 Vollladezyklen erreichen“ und zusätzlich „muss der Akku im vollständig geladenen Zustand nach 500 Vollladezyklen eine Restkapazität ( $Q_{Rest}$ ) von mindestens 80% der Nennkapazität ( $N$ ) aufweisen“.

Neben der im Batteriegesetz (BattG) vorgeschriebenen Angabe der Batteriekapazität, müssen für die Erteilung des Blauen Engel weitere Anforderungen an die Gerätebatterie erfüllt werden. So muss die Bestimmung der Kapazität nach der Norm EN 61960 mit mindestens drei Batterien erfolgen. Desweiterem ist es dem Nutzer zu ermöglichen folgende Informationen über den Geräteakku einzusehen: den Ladezustand (State of Charge, SoC), den Gesundheitszustand (State of Health, SoH) und die bereits erfolgten Vollladezyklen.

Eine Zuarbeit der Autoren dieses Berichts ließ Erkenntnisse aus dem aktuellen Forschungsvorhaben und der zitierten Studie des Umweltbundesamtes zur Lebensdauer von Akkumulatoren der IKT (Clemm et al. 2016a) in die Erarbeitung neuer Kriterien einfließen. Dies betrifft insbesondere die Prüfung der Haltbarkeit der Akkumulatoren sowie den Vorschlag zu einer Software zum Akkuzustand und zur Akkuschonung.

#### 4.4.2 Lebensdauer

Die Lebensdauer von Li-Ion-Akkumulatoren von Notebooks wurde im Forschungsvorhaben des Umweltbundesamtes „Umweltwirkungen von wiederaufladbaren Lithium-Batterien für den Einsatz in mobilen Endgeräten der Informations- und Kommunikationstechnik (IKT)“ (Clemm 2016) unter Laborbedingungen als auch im Feld eingehend untersucht. Im Ergebnis zeigte sich, dass die Lebensdauer der untersuchten Lithium-Ionen-Akkumulatoren verschiedener Hersteller von Tablet-PCs als auch im Vergleich verschiedener Modelle unter Laborbedingungen stark schwankte. Bei einigen der untersuchten Zellen sank der Gesundheitszustand bereits nach wenigen hundert Ladezyklen unter 80 und sogar 60 Prozent der bei Beginn der Untersuchungen bestimmten Bemessungskapazität. Nach 1000 Vollzyklen konnten 11 der 17 Akkuzellen noch mehr als 80 Prozent ihrer ursprünglich bemessenen Kapazität (Bemessungskapazität) speichern und abgeben, nach 2000 Zyklen noch sieben der getesteten Akkus. Die Lebensdauer von Notebook-Akkumulatoren im Feld streute ebenfalls stark. Hier wurde festgestellt, dass Akkumulatoren, die über einige Jahre nur eine geringe Anzahl Vollladezyklen durchlaufen hatten, dennoch stark an Kapazität verloren hatten. Als eine mögliche Begründung wurde angenommen, dass der Betrieb der Geräte im stationären Betriebsmodus (bspw. auf Dockingstationen) zu einem durchschnittlich sehr hohen Ladezustand führt, der die kalendarische Alterung der Zellen beschleunigt (Clemm et al. 2016a).

Die Auswertung zur Ladehäufigkeit anhand der Batteriemanagementsysteme der untersuchten Notebooks zeigte, dass diese bei 75 Prozent der Geräte bei unter 50 Vollladezyklen pro Jahr lag. 29 Prozent der Akkumulatoren durchliefen sogar nur bis zu zehn Vollladezyklen im jährlichen Durchschnitt. Dies stand im starken Kontrast zu untersuchten Geräten einer weiteren Datenquelle. Die Ladehäufigkeit der Akkumulatoren der zweiten Datenquelle verteilte sich über ein breiteres Spektrum (Clemm et al. 2016a), und der Gesundheitszustand auch alter Geräte war teils noch sehr hoch.

Eine Erkenntnis aus den Recherchen des vorliegenden Forschungsvorhabens ist, dass Akkumulatoren i.d.R. von der freiwilligen Herstellergarantie ausgenommen sind oder eine eingeschränkte Herstellergarantie angewandt wird.

**Beispiel Hersteller 1:** *„Die einjährige eingeschränkte [Herstellername]-Garantie deckt den Austausch einer defekten Batterie ab. Wenn Sie einen [zusätzlich zu erwerbende Garantie des Herstellers] für Ihr [Markenname]-Notebook erworben haben, tauscht [Herstellername] die Batterie Ihres Notebooks gebührenfrei aus, sofern ihre Kapazität weniger als 80 Prozent der ursprünglichen Kapazität beträgt. Sollte der Austausch der Batterie nicht abgedeckt sein, fallen hierfür Gebühren an.“* (Webseite des Herstellers)

**Beispiel Hersteller 2:** *„Für im Lieferumfang befindliches oder separat erworbenes Zubehör gilt eine Garantielaufzeit von 6 Monaten. Für den fest eingebauten Akku des Produkts gilt eine Garantielaufzeit von zwölf Monaten.“* (Webseite des Herstellers)

Eine Problemstellung ist es, dass Nutzer in der Regel keinen Einblick in den Gesundheitszustand des Akkumulators ihres Gerätes haben (Clemm et al. 2016a). Laut eines Herstellers im Begleitkreis dieses Forschungsvorhabens wäre die Mehrheit der Anfragen bzgl. Garantieansprüchen wegen mangelnder Leistung von Akkumulatoren zu vermeiden, wenn der Nutzende zusätzliche verlässliche Daten über den Gesundheitszustand des Akkumulators einsehen könnte. Dies wird darin begründet, dass der Akkumulator oftmals in einem guten Zustand ist, jedoch ein Softwareproblem vorliegt, dass den Ladezustand des Akkumulators rapide absinken lässt. Dementsprechend nimmt der Nutzende an, dass der Akkumulator bereits deutlich an speicherbarer Kapazität verloren hat.

### 4.4.3 Entnehmbarkeit

Es konnten keine öffentlich verfügbaren Daten zum Marktanteil von Notebooks mit manuell entnehmbaren und integrierten Akkumulatoren identifiziert werden. Es wird jedoch davon ausgegangen, dass der Marktanteil von Notebooks mit integriertem Akku zunimmt. Prognostizierte Daten zum Marktanteil von Ultrabooks (i.d.R. mit integriertem Akkumulator) für das Jahr 2015 lagen bei knapp 43 Prozent (investors.com). In der nicht-repräsentativen Auswahl der Notebook Modelle für Demontageversuche (Kapitel 3.4.5) hatten vier von neun Geräten einen integrierten Akkumulator. Im Test der Stiftung Warentest im Jahr 2016 hatten fünf der sieben getesteten Notebooks einen integrierten Akkumulator (Stiftung Warentest 2016). Wie in Kapitel 3.4.6 beschrieben, kann weiterhin festgestellt werden, dass einige Geräte am Markt jeweils mit einem integrierten und einem manuell austauschbaren Akkumulator ausgestattet sind.

## 4.5 Fallstudie 2: Smartphones

### 4.5.1 Bestehende Anforderungen

Im Folgenden werden die in Kapitel 3.2.1 und 3.2.2 eingeführten gesetzlichen Anforderungen und Umweltzeichen hinsichtlich ihrer, nach Einschätzung der Autoren, sinnvollen Designanforderungen für Smartphone-Akkumulatoren diskutiert.

Der Blaue Engel für Mobiltelefone (RAL-UZ 106 2017) stellt eine Reihe von Anforderungen bzgl. des Akkumulators in Smartphones. Die Konstruktion des Gerätes soll erlauben, *„dass die wiederaufladbare Batterie durch die Endnutzenden ohne besondere Fachkenntnisse ausgetauscht werden kann, ohne dass das Telefon dabei beschädigt wird.“* Weiterhin: *„Die Entnahme der Akkus für Recyclingzwecke muss ohne besondere Fachkenntnisse effizient möglich sein (Richtwert: innerhalb von 5 Sekunden). Die im Akku enthaltenen Chemikalien dürfen dabei nicht austreten.“*

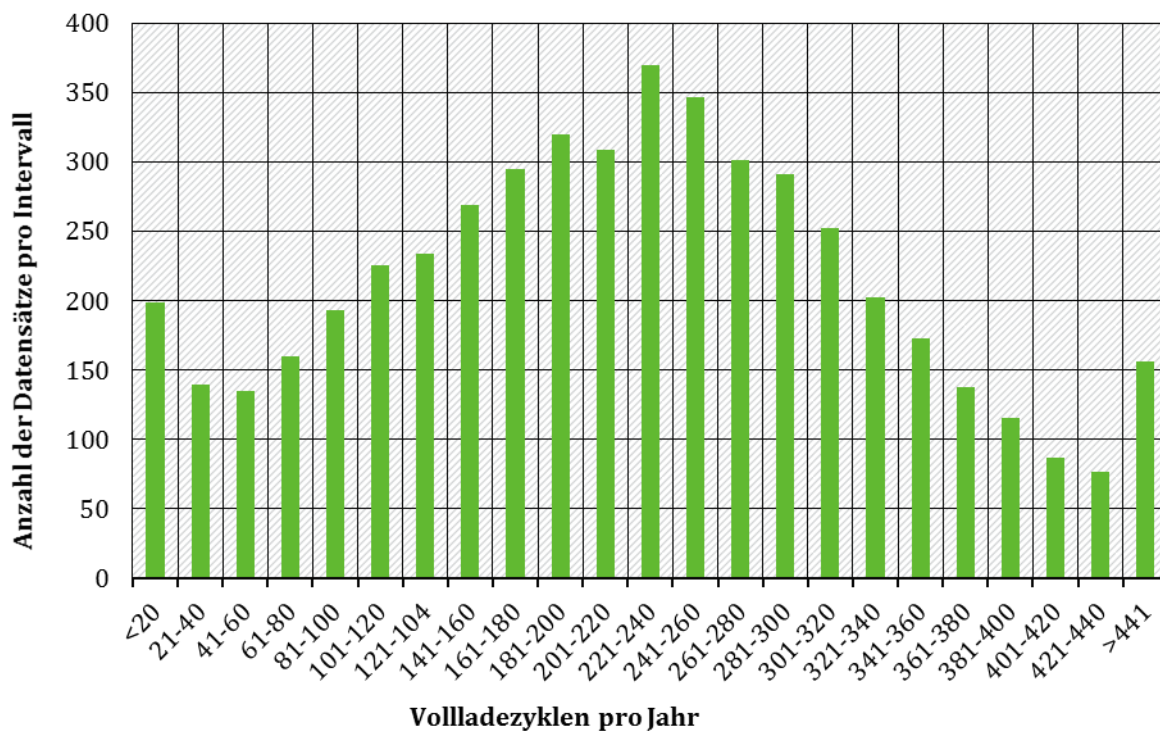
Weiterhin soll der Akkumulator mit der Zellchemie entsprechend des Normenentwurfes IEC 62902 gekennzeichnet sein. Für die Haltbarkeit der Akkus wird gefordert, dass *„der Akku im vollständig geladenen Zustand nach 500 Vollladezyklen eine Restkapazität ( $Q_{Rest}$ ) von mindestens 90% der Nennkapazität ( $N$ ) aufweisen“* muss.

Eine Zuarbeit der Autoren dieses Berichts ließ Erkenntnisse aus dem aktuellen Forschungsvorhaben und der zuvor zitierten Studie des Umweltbundesamtes zur Lebensdauer von Lithium-Ionen-Akkumulatoren in IKT (Clemm et al. 2016a) in die Erarbeitung neuer Kriterien einfließen.

### 4.5.2 Lebensdauer

Daten zur Lebensdauer und Ladehäufigkeit von Smartphone Akkumulatoren im Feld werden von den Herstellern nicht veröffentlicht. Untersuchungen anhand Akkumulatoren von Smartphones eines marktführenden Herstellers (Clemm et al. 2016b) deuten jedoch darauf hin, dass diese potentiell auch nach einigen Jahren der Nutzung noch einen guten Teil ihrer Kapazität speichern und abgeben können. Es wird jedoch darauf hingewiesen, dass die Daten mittels Software direkt aus den Geräten ausgelesen wurden und keine Bemessung der Kapazität darstellen. Mögliche fehlerhafte Werte können daher nur bedingt identifiziert und aus der Untersuchung ausgeschlossen werden. Die Ladehäufigkeit entsprechend der Datensätze von über 4.800 Geräten der zitierten Studie war annähernd normal verteilt. Durchschnittlich durchliefen die Smartphones 218 Vollladezyklen im Jahr, was 0,6 Vollzyklen täglich entspricht (Abbildung 73).

Abbildung 73: Verteilung der Ladehäufigkeit von Smartphones eines Herstellers



Das Diagramm zeigt die Ladehäufigkeit der Geräteakkumulatoren von Smartphones eines Herstellers in Intervallen von 20 Vollladezyklen.

Quelle: (Clemm et al. 2016b)

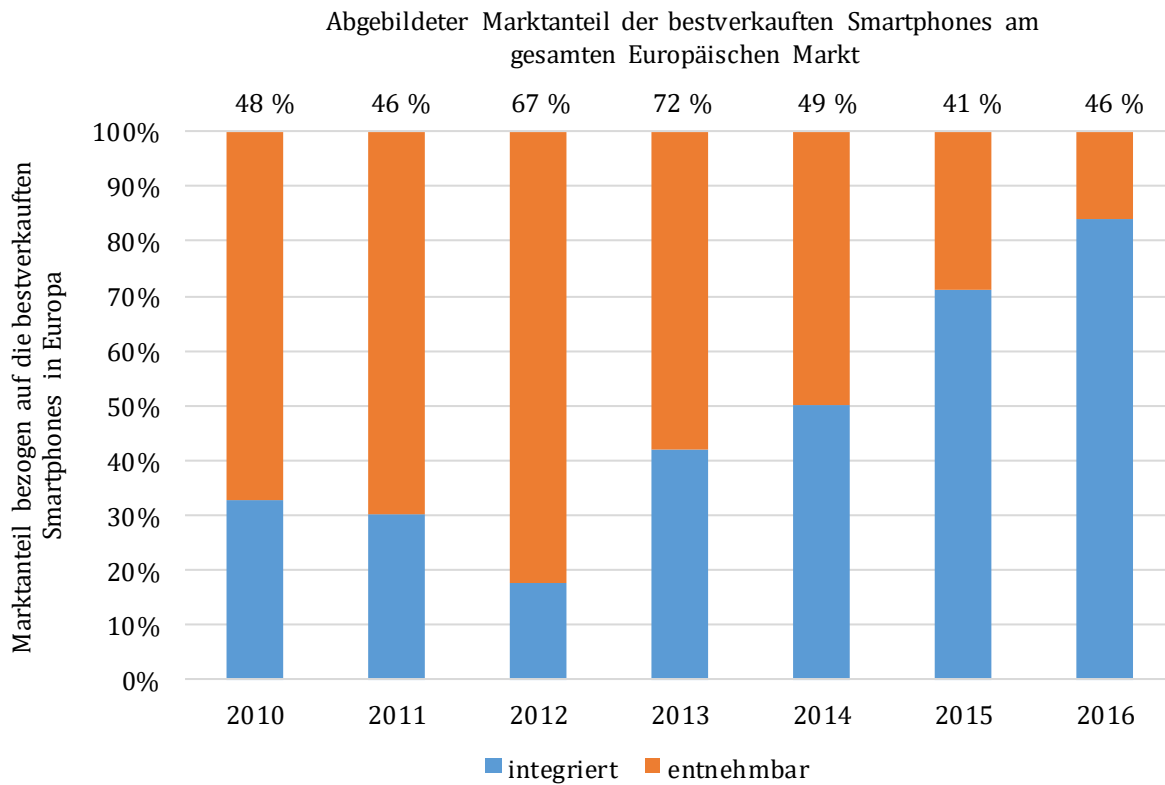
Bei Lebensdaueruntersuchungen mit Smartphone Akkumulatoren (Gerätebatterien des Smartphones DUT\_5) wurde festgestellt, dass diese unter Laborbedingungen und bei Raumtemperatur (25°C) durchschnittlich 800 Vollladezyklen durchlaufen (1 Vollladezyklus = 100% der Bemessungskapazität), bevor 80 Prozent der speicherbaren Kapazität irreversibel verloren ist. Zum Vergleich wurden weitere Zellen für den Betrieb in IKT Geräten eines Drittanbieters bezogen, deren Ergebnisse im Vergleich stark schwankten und die unter den gleichen Bedingungen rund doppelt so schnell degradierten wie die Geräteakkus von DUT\_5 (Dethlefs 2017).

#### 4.5.3 Entnehmbarkeit

Zur historischen Entwicklung und dem aktuellen Stand der Entnehmbarkeit von Akkus bei marktrelevanten, aktuellen Geräten der IKT liegen momentan kaum öffentlich zugängliche Informationen vor. In der Studie Bartnik (Bartnik et al. 2013) wurden 13 Smartphones demontiert und auf die Entnehmbarkeit der Akkus untersucht. Im Ergebnis waren die Akkus bei allen Geräten manuell (ohne Werkzeug) entnehmbar. Die untersuchten Geräte stammten jedoch aus den Jahren 2006 bis 2012 (Markteinführung) und bilden damit nur bedingt den aktuellen Stand der Technologieentwicklung ab.

Der Trend zur Integration von Akkumulatoren in Smartphones kann anhand der Akkuentnehmbarkeit von verkaufstarken Modellen belegt werden (Abbildung 74). Marktdaten zu den absatzstärksten Smartphones in Europa (Counterpoint Research 2017) wurden mit Daten zur Entnehmbarkeit des Akkumulators bei den jeweiligen Modellen hinterlegt. Die Daten zu den Jahren 2010 bis 2016 deuten darauf hin, dass der Anteil der Smartphones mit für den Nutzer und ohne den Einsatz von Werkzeug wechselbarem Akku, seit 2012 kontinuierlich zurückgeht. Anzeichen für eine Umkehr dieses Trends werden zum Zeitpunkt der Berichtsfassung nicht gesehen.

Abbildung 74: Entwicklung der Entnehmbarkeit von Akkus aus den bestverkauften Smartphone Modellen nach Erscheinungsjahr zwischen 2010 und 2016 auf Basis von Daten von Counterpoint Research



Die Aufstellung enthält Marktdaten von den bestverkauften Smartphone Modellen je Jahr. Die Anzahl der Modelle, von denen Daten in die Aufstellung einfließen, lag zwischen 16 (im Jahr 2010) und 25 (im Jahr 2016). Der addierte Marktanteil dieser Modelle am gesamten Europäischen Markt ist oberhalb der Datensäulen angegeben und variiert, je nach Jahr, zwischen 46 und 72 Prozent. Daten zu den weiteren verkauften Smartphone Modellen und zu deren Konstruktion liegen dem Forschungsvorhaben nicht vor.

Quelle: Eigene Darstellung, Technische Universität Berlin

## 4.6 Fallstudie 5: E-Book-Reader

### 4.6.1 Bestehende Anforderungen

Es konnte keine spezifischen Anforderungen aus gesetzlichen oder freiwilligen produktpolitischen Instrumenten an E-Book-Reader identifiziert werden.

### 4.6.2 Lebensdauer

Der Energieverbrauch von E-Readern ist im Vergleich zu Notebooks, Tablets und Smartphones relativ gering. Dies liegt zum einen an der im Vergleich deutlich geringeren Rechenleistung, die zur Bereitstellung der Funktionen benötigt wird und zum anderen an den stromsparenden E-Ink Displays („elektronisches Papier“), die nur beim Wechseln des Anzeigehaltes (z.B. Seite umblättern) Energie benötigen. Die E-Ink-Displays sind auch im Tageslicht ohne Hintergrundbeleuchtung lesbar, diese lässt sich bei einigen Geräten jedoch optional zuschalten. Features, die den Energieverbrauch erhöhen, sind die vermehrt eingesetzten LED-basierten Displayhintergrundbeleuchtungen sowie das Bereitstellen von mobilen Datenverbindungen.

Die Akkulaufzeit hängt u.a. von folgenden Faktoren ab:

- ▶ Akkukapazität und Stromverbrauch des Gerätes
- ▶ Lesegeschwindigkeit (Umblättern der Seiten je Zeiteinheit)
- ▶ Einstellung der Hintergrundbeleuchtung
- ▶ Datenverbindungen

Dazu kommen die typischen Faktoren, die die Laufzeit von Lithium-Ionen-Akkus beeinflussen, wie die Umgebungstemperatur.

Die Akkulaufzeit wird aufgrund der oben beschriebenen Eigenschaften oftmals in Seiten je Akkuladung angegeben. Bei durchschnittlicher Lesegeschwindigkeit ergeben sich daraus Angaben zur Akkulaufzeit in Stunden. Die Hersteller machen auf Ihren Websites keine exakten Angaben, sondern geben die Laufzeit lediglich mit „einige Wochen“ oder „über einen Monat“ an. Konkretere, veröffentlichte Daten konnte nicht identifiziert werden. Bedingt durch den geringen Stromverbrauch kann jedoch von einer geringen Ladehäufigkeit ausgegangen werden.

### 4.6.3 Entnehmbarkeit

Für E-Reader standen dem Vorhaben keine historischen Daten über die meistverkauften Geräte zur Verfügung. Um einen orientierenden Eindruck über den Stand der Entnehmbarkeit von Akkus aus aktuellen, verkaufstarken Geräten zu erhalten, wurde auf die Auflistung der meistverkauften Geräte durch den Online-Versandhändler Amazon zurückgegriffen. Die Auflistung der 50 meistverkauften Produkte der Kategorie „E-Book-Reader“ enthielt zum Zeitpunkt der Datenerhebung<sup>20</sup> 43 verschiedene E-Reader Modelle. Die verbleibenden sieben Positionen waren Zubehörartikel oder Produkte, die nicht der Kategorie E-Reader angehören. Nach eingehender Recherche konnte festgestellt werden, dass bei 40 der 43 E-Reader Modelle der Akku fest im Gerät verbaut war. Bei den drei verbleibenden Geräten konnte keine eindeutige Erkenntnis über die Entnehmbarkeit des Akkus gewonnen werden. Die anschließende Online-Recherche spezifisch nach E-Readern mit entnehmbarem Akku resultierte in nur einem Gerät.

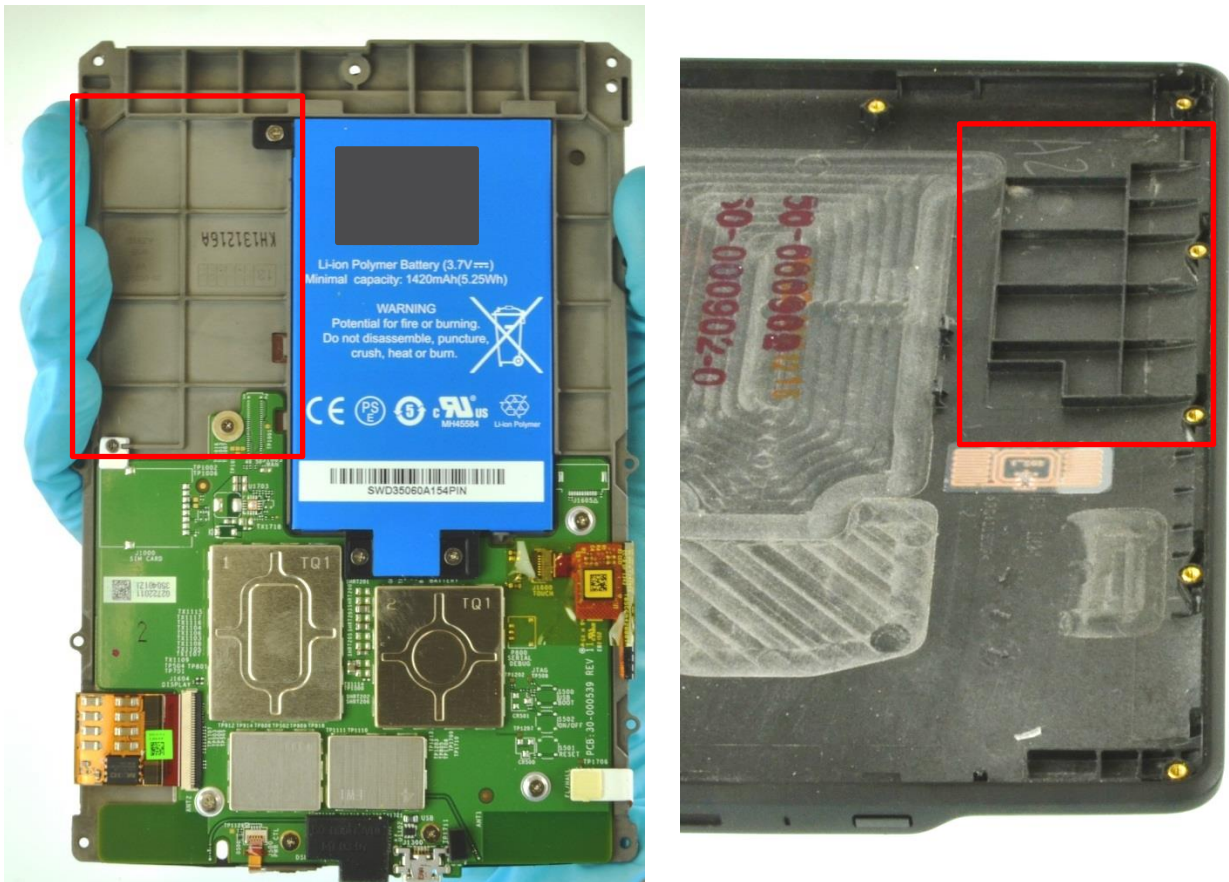
In der Demontage eines E-Readers und ergänzenden Onlinerecherche wurde festgestellt, dass der Akku im Vergleich zu Smartphones einen geringeren Anteil der Fläche im Gerät belegt. Ein ähnliches Bild ergibt sich bei anderen Modellen bei der Betrachtung von Gerätedemontagen der einschlägigen Webseiten<sup>21</sup>. Es kann angenommen werden, dass die Größe der Geräte im Wesentlichen durch die Displaygröße bestimmt wird. Platzmangel im Geräteinneren scheint trotz der geringen Bautiefe kein Problem zu sein. Vielmehr wird der ungenutzte Raum für verstärkende Strukturen der Kunststoffgehäuse genutzt (Abbildung 75).

---

<sup>20</sup> Datenerhebung am 7. September 2015 unter <http://www.amazon.de/gp/bestsellers/photo/671895031#3>

<sup>21</sup> Beispielsweise iFixit <https://de.ifixit.com>

Abbildung 75: Teildemontierter E-Book-Reader; Markierung zeigt ungenutzte Fläche mit Kunststoffstabilisierungsstrukturen im Geräteinneren



Quelle: Eigene Darstellung, Technische Universität Berlin

Vor diesem Hintergrund kann die Einschätzung getroffen werden, dass der Einsatz von entnehmbaren Akkus oder Akkus mit festem Gehäuse (im Gegensatz zu Pouchzellen) nicht zwangsläufig zu größeren Geräteabmessungen bei gleichbleibender Akkukapazität führt. Weiterhin kann ein austauschbarer Akku mit festem Gehäuse die o.g. Stabilisierung des Gehäuses potenziell unterstützen.

Wie bei Smartphones ist der Schutz vor dem Eindringen von Staub und Flüssigkeiten ein Thema, das die Langlebigkeit der Geräte betrifft und potentiell unter Verbraucherschutzaspekten zur Legitimierung eines integrierten Akkumulators herangezogen werden kann.

#### 4.7 Fallstudie 6: Elektrische Zahnbürsten

Elektrische Zahnbürsten gibt es im Wesentlichen in zwei verschiedenen Varianten: Batteriebetriebene Zahnbürsten, die von einer nicht-aufladbaren, austauschbaren Batterie betrieben werden, und akkubetriebene Zahnbürsten, die durch einen wiederaufladbaren Akkumulator betrieben werden.

Elektrische Zahnbürsten haben insbesondere in Europa, den USA und Japan einen hohen Marktanteil. In Deutschland liegt der Anteil elektrischer Zahnbürsten bei weit über 50 Prozent des Marktvolumens (monetärer Wert), wobei der Anteil der batteriebetriebenen (statt akkubetriebenen) Zahnbürsten dabei relativ gering ausfällt (Euromonitor 2015). In Deutschland wird der Markt der elektrischen Zahnbürsten im Wesentlichen von zwei Herstellern beherrscht. Im Jahr 2015 war ein Hersteller mit 60 Pro-

zent Marktanteil vertreten, der zweite mit 37 Prozent, und sonstige Hersteller mit 3 Prozent Marktanteil (diverse Quellen Marktforschung; Statista 2017<sup>22</sup>). Eine andere Datenquelle gibt die Anzahl der Verwender von elektrischen Zahnbürsten in Deutschland für Hersteller 1 mit knapp über 10 Millionen Personen an, für Hersteller 2 nur von knapp über einer Million für das gleiche Jahr (weitere Hersteller in Summe knapp 5 Millionen Personen) (VuMA, Statista 2017<sup>23</sup>).

Eine im Begleitkreis des Forschungsvorhabens teilnehmende Erstbehandlungsanlage gab an, dass Batterien aus elektrischen Zahnbürsten nicht unbedingt entnommen werden, da der Prozess der Entnahme zu aufwendig ist. Die Geräte werden als Ganze in einer Sammelbox zwischengelagert. In der Sammelbox kam es laut Aussage der Behandlungsanlage bereits mehrfach zu Bränden. Die Vereinfachung der Entnehmbarkeit von Batterien und Akkumulatoren aus elektrischen Zahnbürsten ist demnach eine relevante Aufgabe des produktbezogenen Umweltschutzes.

#### 4.7.1 Bestehende Anforderungen

Es konnten keine spezifischen Anforderungen aus gesetzlichen oder freiwilligen produktpolitischen Instrumenten an elektrische Zahnbürsten identifiziert werden.

#### 4.7.2 Lebensdauer

Die Kapazität üblicher elektrischer Zahnbürsten reicht i.d.R. mehrere Tage je Ladevorgang. Dies entspricht einem Vollladezyklus in mehreren Tagen. Eine Webseite, die elektrische Zahnbürsten testet<sup>24</sup>, macht folgende Angaben:

*“Most brushes will last at least 1 week between charges based on 1 user completing 2 x 2 minute cleans. Therefore the vast majority will run for 28 minutes from a full charge.”*

Die meisten Bürsten halten für eine Woche zwischen den Ladevorgängen, wenn ein Nutzer [täglich] 2 x 2 Minuten putzt. Daher läuft die Mehrheit [der Bürsten] für 28 Minuten bei voller Ladung. (Übersetzung der Autoren)

Mit nur einem Vollladezyklus je Woche wird davon ausgegangen, dass die kalendarische Alterung für die Alterung der Zellen bedeutender ist als die Zyklenalterung, trotz einer relativ hohen angenommenen Entladerate bei der Zyklisierung (vollständige Entladung im Gebrauch < 30 min, d.h. > 2C Entladerate). Weiterhin wird davon ausgegangen, dass ein typisches Nutzungsmuster bei elektrischen Zahnbürsten das Verbleiben auf der Ladestation zwischen den einzelnen Nutzungsintervallen darstellt und elektrische Zahnbürsten somit durchschnittlich einen sehr hohen Ladezustand aufweisen. Dies kann die kalendarische Alterung deutlich beschleunigen (vgl. Kapitel 4.2.2). Die Wahrscheinlichkeit, dass die Batterie zur lebensdauerbegrenzenden Komponente wird, insbesondere, wenn sie nicht durch den Nutzer austauschbar ist, steigt dementsprechend.

#### 4.7.3 Entnehmbarkeit

Marktdaten zu konkreten Zahnbürstenmodellen waren nicht öffentlich verfügbar. Zur Orientierung wurden analog zum Vorgehen bei E-Readern (Kapitel 4.6.3) die fünfzig Bestseller der Onlineplattform Amazon herangezogen. Von den 50 Produkten stammten 26 von einem Hersteller, 17 von einem zweiten Hersteller und die verbleibenden 7 Produkte von vier verschiedenen Herstellern. Ein weiteres Produkt war inkorrekt kategorisiert (Zahnbürstenzubehör). Von den 49 elektrischen Zahnbürsten waren 45 akkubetrieben und 4 batteriebetrieben. Unter den akkubetriebenen Zahnbürsten konnte bei 33 ein

<sup>22</sup> <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/518550/umfrage/marktanteile-von-unternehmen-fuer-elektrische-zahnbuersten-in-deutschland/>

<sup>23</sup> <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/182768/umfrage/verwendete-marken-von-elektrischen-zahnbuersten/>

<sup>24</sup> <http://www.electriceeth.co.uk/long-electric-toothbrushes-last/>

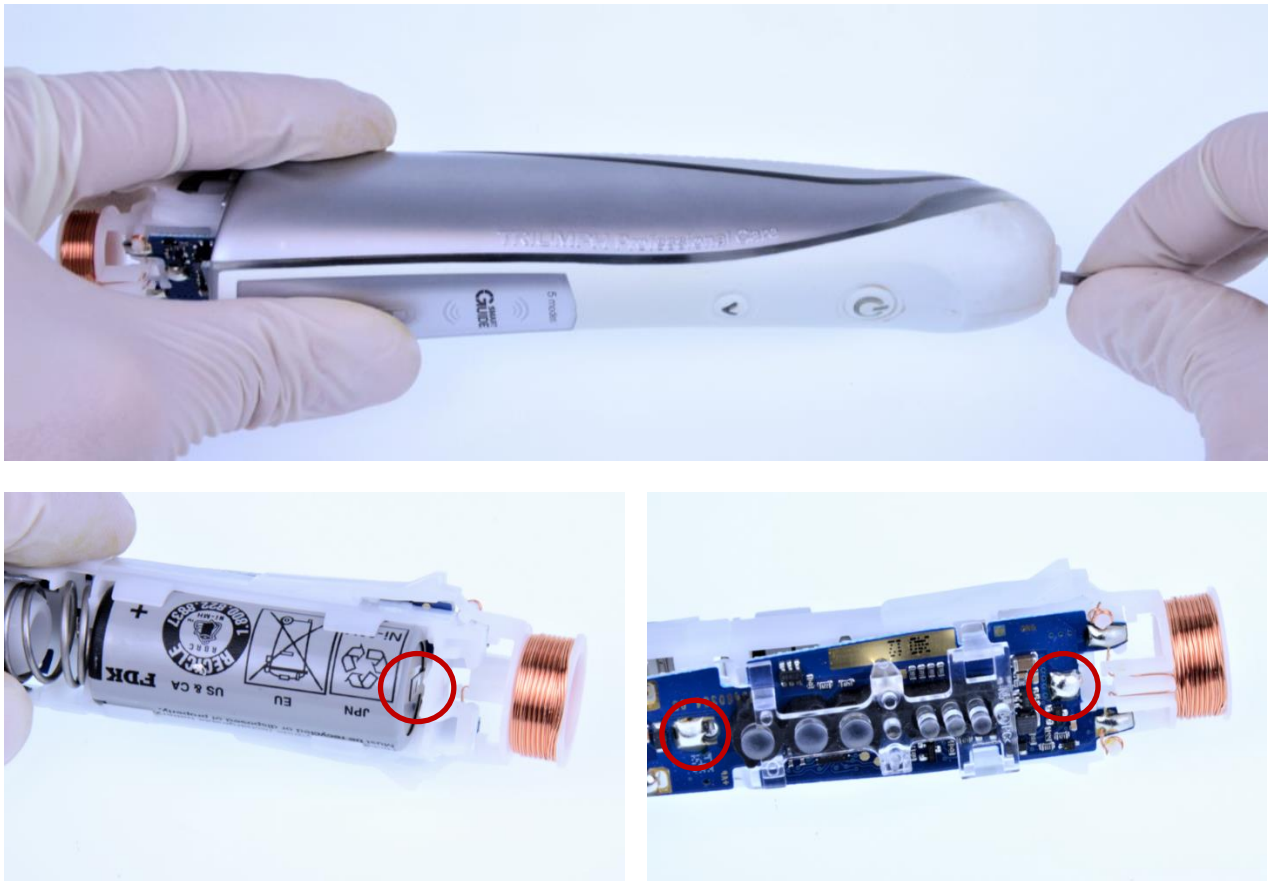
integrierter (nicht wechselbarer) Akku festgestellt werden. Bei den übrigen 12 waren keine Angaben zu finden. Demnach konnten keine Zahnbürste mit wechselbarem Akkumulator in der Stichprobe identifiziert werden. Die eingesetzte Akkutechnologie wurde nicht in jedem Fall vom Hersteller angegeben. In der Stichprobe wurden bei 16 Geräten Lithium-Ionen-Akkumulatoren und bei sechs Geräten Nickel-Metallhydrid-Akkumulatoren identifiziert.

Als zusätzliche Datenquelle wurden Testergebnisse der Stiftung Warentest aus den Jahren 2013 bis 2016 herangezogen. Von den insgesamt 31 getesteten Zahnbürsten waren 19 akkubetrieben, 11 batteriebetrieben und ein Gerät nur im Netzbetrieb nutzbar. Im Jahr 2013 waren jeweils sieben der 14 getesteten Zahnbürsten akku- bzw. batteriebetrieben, im Jahr 2016 waren sechs der acht getesteten Bürsten akkubetrieben.

Als weitere Datenquelle wurden 41 entsorgte elektrische Zahnbürsten mit integriertem Akkumulator von einem am Begleitkreis teilnehmenden Akteur der Recyclingkette zur Verfügung gestellt. Davon stammten 25 Geräte von einem Hersteller, 15 von einem zweiten, und einem Gerät konnte kein Hersteller zugeordnet werden. Unter den 41 Geräten wurden 11 verschiedene Modelle identifiziert. Sechs dieser Modelle wurden mit einem NiMH Akku betrieben, drei mit einem Li-Ion Akku, eins mit einem NiCd Akku und eins mit einer primären Batteriezelle. Die 11 Modelle unterschieden sich jeweils in ihrem Öffnungsmechanismus. Bei den beiden häufigsten Modellen (15 Geräte) wird eine Verschlusskappe an der Unterseite anhand der passgenauen Ladestation aufgeschraubt, um an das Geräteinnere zu gelangen, wie beispielhaft in Abbildung 76 dargestellt ist. Bei einem weiteren Modell des gleichen Herstellers (8 Geräte) war die Verschlusskappe mittels Clips befestigt und konnte nur mittels Hebelbewegung mit einem Schraubenzieher und dem Risiko einer Beschädigung vom Gerät gelöst werden. Bei dem am häufigsten vorkommenden Modell eines zweiten Herstellers (10 Geräte) musste mittels einer Zange beidseitig Druck auf die Unterseite des Geräts ausgeübt werden, um das Geräteinnere herauszuschieben zu können. Weitere Modelle waren verschraubt, oder es war kein Öffnungsmechanismus zu erkennen. Eine einheitliche Vorgehensweise beim Öffnen der Geräte war nicht möglich.

Abbildung 76: Demontage einer elektrischen Zahnbürste





Der typische Öffnungsmechanismus bei Geräten eines der marktrelevanten Herstellers: Zunächst wird eine Kunststoffringdichtung am oberen Ende gelöst (oben links), anschließend mittels der passgenauen Ladestation am unteren Ende eine Verschlusskappe abgeschraubt (oben rechts). Das Innenleben lässt sich anschließend von oben aus dem Gehäuse schieben (mitte). Der Akkumulator wird mittels Feder angepresst (unten links) und ist mittels Lötflächen direkt an die Leiterplatte gelötet (unten rechts).

Quelle: Eigene Darstellung, Technische Universität Berlin

Bei acht der 11 Modelle der untersuchten Stichprobe war der Akku im inneren des Gerätes an die Leiterplatte gelötet. Zwei weitere Modelle konnte nicht zerstörungsfrei geöffnet werden. Ein Modell wurde mit einer wechselbaren Batterie betrieben. Die nicht-repräsentative Stichprobe deutet darauf hin, dass das Verlöten der Batterie in Zahnbürsten mit integriertem Akkumulator gängige Praxis ist.

Um zu einer Einschätzung zu gelangen, ob Akkus aus elektrischen Zahnbürsten während der Nutzungsphase austauschbar sein sollten, ist die Lebensdauer der Akkus von entscheidender Bedeutung. Konkrete Daten zur Lebensdauer konnten in der Literatur jedoch nicht identifiziert werden. Die Stiftung Warentest durchläuft in ihren Haltbarkeitstests 2.250 Prüfzyklen, die je aus 4 x 2 Minuten Laufzeit und einer Minute Pause bestehen (9 Minuten je Prüfzyklus und ca. 14 Tage Gesamtprüfdauer). Dies soll eine Lebensdauer von 6 Jahren simulieren, bei angenommenen vier Putzvorgängen je Tag (bei zwei Benutzern)<sup>25</sup>. Diese Tests bilden zwar eine beschleunigte Alterung des Gerätes ab, aber nicht unbedingt die des Akkumulators. Hier wird aus Sicht der Autoren angenommen, dass aufgrund der geringen Lade- und Entladeströme und der relativ geringen erwarteten Ladehäufigkeit die kalendarische Alterung des Akkus gegenüber der Zyklenfestigkeit in den Vordergrund tritt.

25 <https://www.test.de/Zahnbuersten-im-Test-4621863-4621866/>

Im Prozess der Schadstoffentfrachtung ist es hinderlich, wenn Akkumulatoren in Zahnbürsten integriert und verlötet sind. Hier kann angenommen werden, dass Akkus nicht in jedem Fall aus den Geräten entnommen werden, da der Aufwand einer manuellen und schonenden Demontage relativ hoch ist und bei einer zerstörenden Entnahme die Gefahr der Beschädigung des Akkumulators besteht. Diese Annahme wurde in Interviews mit Erstbehandlungsanlagen bestätigt.

Der mit dem größten Marktanteil in Deutschland vertretene Hersteller (60 Prozent laut Marktforschungsdaten) macht auf seiner Internetseite die folgende Angabe zur Austauschbarkeit von Akkus aus allen angebotenen elektrischen Zahnbürsten:

*„Der Akku der elektrischen Zahnbürste kann nicht ausgetauscht werden. Das Handstück ist versiegelt, um ein Eindringen von Wasser zu verhindern.“*

Der wesentliche Grund, aus dem Hersteller Batterien in elektrische Zahnbürsten integrieren, ist der Schutz vor dem Eindringen von Flüssigkeiten als bedeutender Faktor für die Lebensdauer der Geräte. Naturgemäß werden Zahnbürsten im Nassbereich eingesetzt, mit Wasser abgespült, usw. Entsprechend wichtig ist der Schutz vor dem Eindringen von Flüssigkeiten, um Korrosion und frühzeitigen Ausfall der elektrischen Baugruppen und -elemente zu vermeiden.

Dies ist zwar sinnvoll, um die Zuverlässigkeit und damit potentiell die Lebensdauer der Zahnbürste zu erhöhen, stellt jedoch auch eine entscheidende technische Hürde für den Austausch des Akkus durch den Nutzer dar. Die Wahrscheinlichkeit einer Beschädigung im Falle des Reparaturprozesses durch den Nutzenden ist weiterhin durch die benötigten Lötprozesse als vergleichsweise hoch einzuschätzen. D.h. ein Austausch bzw. die Entnahme des Akkumulators ist im Produktdesign nicht vorgesehen. Dazu wird angemerkt, dass sich auch elektrische Zahnbürsten mit integrierten Akkumulatoren öffnen lassen. Dazu wird oftmals ein Element der Ladestation als Werkzeug verwendet um das Gehäuse zu öffnen. Anschließend wird das Gehäuse von der internen Struktur und den elektrischen Baugruppen repariert. Es ist also denkbar, dass ein Gerät wasserdicht ist, und der Akku dennoch ohne Lötvorgang ausgetauscht werden kann.

Eine weitere Frage, die sich stellt, ist, ob aus Sicht der Ressourceneffizienz die Lithium-Ionen oder Nickel-Metallhydrid Akkutechnologie vorteilhafter ist. Diese Frage kann ohne eine Umweltbewertung in diesem Forschungsvorhaben jedoch nicht beantwortet werden, da beide Technologien den Einsatz von Sondermetallen wie Kobalt und Seltenen Erdmetallen erfordern. Mit Blick auf für eine Umweltbewertung relevante Materialien wird die Zusammensetzung von NiMH Akkus in der Literatur wie folgt angegeben: Nickel 36–42 Prozent; Kobalt 3–4 Prozent; Mischmetall 8–10 Prozent, bestehend aus Legierungen der Seltenen Erdmetalle Lanthan, Cerium, Praseodym und Neodym (Müller und Friedrich 2006). Andere Quellen geben Nickel mit 17,9 Prozent, Eisen mit 15,4 Prozent, Kobalt mit 4,4 Prozent und Seltene Erdmetalle mit 17,3 Prozent Massenanteil an (Lin et al. 2016). Die durchschnittliche Zusammensetzung eines Lithium-Ionen-Akkumulators wird in der Literatur mit 13,5 Prozent Kupfer, 3,9 Prozent Nickel, und 8,4 Prozent Kobalt angegeben (Tecchio et al. 2017).

## 5 Teil III: Ableitung von Designanforderungen

Das Design elektronischer Produkte im Sinne der Kreislaufwirtschaft erfordert ein Vorausdenken des Produktdesigners über den gesamten Lebensweg (Life Cycle Thinking). Soll ein Gerät robust konstruiert sein, um eine möglichst geringe Ausfallrate und somit eine lange Nutzung anzustreben, oder soll eine modulare Bauweise Hürden für Reparatur und Demontage vermindern? Diese Fragen müssen ebenfalls bedacht werden, wenn Anforderungen an das Produktdesign seitens der Politik gestellt werden. Ein „Design for Recycling“ ist im Sinne der Kreislaufwirtschaft und der Abfallhierarchie erst dann sinnvoll, wenn Robustheit, Reparierbarkeit, und Wiederverwendbarkeit von der Anforderung mitgedacht und zumindest nicht durch sie vermindert werden. Ebenfalls muss in der Gestaltung von Designanforderungen bedacht werden, ob eine Designmaßgabe tatsächlich zu einer verbesserten Kreislaufführung der Zielmaterialien führen kann. Hierbei ergibt sich ein komplexes Zusammenspiel verschiedener Faktoren, nicht zuletzt die mittelfristige Entwicklung verfügbarer Recyclingtechnologien sowie die zu erwartender Stoffströme in den Behandlungs- und Recyclinganlagen (vgl. auch Projektscreening Kapitel 3.3).

Die durch Anforderungen zu adressierenden Problemstellungen sind als Leitfragen bereits in Kapitel 3.1 dargelegt: Welche Vielzahl an Werkstoffen wird in welchen Kombinationen und Konzentrationen eingesetzt? Erlaubt die Konstruktion der Geräte eine Trennung der Werkstoffe, die nicht im gleichen Recyclingpfad stofflich zurückgewonnen werden können, durch verfügbare Behandlungsprozesse?

Anforderungen an das Produktdesign mit dem Ziel der Verbesserung der Kreislaufführbarkeit der Zielstoffe im Forschungsvorhaben, adressieren daher unter anderem die Vielfalt und Recyclingfähigkeit der eingesetzten Materialien und die Möglichkeit der Zuführung von Werkstoffen in sachgerechte Recyclingpfade durch die Separierung der entsprechenden Produktkomponenten.

### 5.1 Herangehensweise

Designanforderungen an die Produktgruppen im Fokus des Forschungsvorhabens wurden auf Basis der in den vorangehenden Kapiteln dargestellten Datengrundlage entwickelt. Zu den im Vorhaben identifizierten Problemstellungen wurden Lösungsansätze in Form von Anforderungen an das Produktdesign formuliert, die teilweise von als notwendig erachteten Anforderungen an die Behandlung der Geräte im Recyclingprozess ergänzt werden. Dabei wird unterschieden zwischen produktgruppenspezifischen Anforderungen (insb. Kapitel 5.2 - 5.7) und produktgruppenübergreifenden Anforderungen (insb. Kapitel 5.8 - 5.9). Inhaltlich liegt der Fokus auftragsgemäß auf einer verbesserten Recyclingfähigkeit, insbesondere auf der Kreislaufführbarkeit von Edel- und Sondermetallen sowie Kunststoffen. Designanforderungen für weitere kreislaufwirtschaftliche Aspekte, wie Langlebigkeit und Reparierbarkeit, werden im Sinne der Abfallvermeidung ebenfalls in Betracht gezogen, stehen aber nicht im Vordergrund.

Der Ausführung von Fügstellen zwischen Komponenten in elektronischen Geräten kommt eine besondere Bedeutung im Kontext der Designanforderungen zu. So können Fügstellen als lösbare oder unlösbare Verbindungen charakterisiert werden. Laut DIN 8593-0<sup>26</sup> sind lösbare Verbindungen ohne die Beschädigung der gefügten Teile wieder lösbar. Nichtlösbare Verbindungen können nur unter Inkaufnahme einer Beschädigung oder Zerstörung der gefügten Teile wieder gelöst werden. Für das Vermeiden, die Wiederverwendung und die Schadstoffentfrachtung von Elektronikgeräten und deren Komponenten, können lösbare Verbindungen zwischen den verbauten Elementen einen bedeutenden

---

<sup>26</sup> Norm DIN 8593-0:2003-09: Fertigungsverfahren Fügen - Teil 0: Allgemeines; Einordnung, Unterteilung, Begriffe. Beuth Verlag, 2003.

Beitrag leisten. Lösbare Verbindungen begünstigen die Demontagefähigkeit von Produkten und damit implizit deren Reparaturfähigkeit und Weiternutzung, aber auch die Schadstoffentfrachtung.

Eine Charakterisierung der Fügeverfahren hinsichtlich ihrer Lösbarkeit bietet die DIN 8593-0 zwar in der Tabelle 2 an, kann hier jedoch, speziell bei den in diesem Forschungsvorhaben wichtigen Fügeverfahren des Lötens und Klebens, keine eindeutige Charakterisierung leisten. So werden Löt- und Klebverbindungen zwar als „im Allgemeinen nur mit Schädigung oder Zerstörung der Fügeteile lösbar“ charakterisiert, jedoch wird für beide Fügeverfahren auf bestehende Sonderfälle mit lösbaren Verbindungen hingewiesen. Bei Lötverbindungen betrifft dies die Verbindung von elektronischen Bauteilen mit Leiterplatten. Bei Klebverbindungen wird lediglich allgemein auf Spezialfälle verwiesen, bei welchen die verbundenen Komponenten ohne Beschädigung wieder voneinander lösbar sind. Im Folgenden werden die Begriffe lösbare Verbindung und nicht lösbare Verbindung im Sinne der Definition der DIN 8593-0 verwendet.

Jede Designanforderung wird mit einer kurz zusammengefassten Begründung eingeleitet, die sich auf Erkenntnisse der vorangehenden Kapitel bezieht. Es erfolgt eine qualitative Bewertung jeder Anforderung anhand der eingeschätzten ökologischen Relevanz, Effektivität und Umsetzbarkeit.

- ▶ Die Relevanz ergibt sich insbesondere aus der Einschätzung der Recyclingrelevanz sowie dem Ausmaß der Problemstellung zum aktuellen Zeitpunkt und in der mittelfristigen Zukunft.
- ▶ Die Effektivität ergibt sich aus der Einschätzung des Effektes der jeweiligen Designanforderung auf die Ressourcenschonung und Abfallvermeidung unter verschiedenen produktpolitischen Instrumenten.
- ▶ Die Umsetzbarkeit beschreibt nach Einschätzung der Autoren die politische als auch die technische Umsetzbarkeit durch die betroffenen Hersteller. Hierzu werden unter anderem sich am Markt befindliche Produktbeispiele in Betracht gezogen, als auch Aspekte der Messbarkeit und damit Prüfbarkeit durch Marktaufsichtsbehörden.

Abschließend wurden Handlungsempfehlungen anhand der Bewertung der Designanforderungen formuliert. Die Handlungsempfehlungen ergeben sich insbesondere aus der relativen Einschätzung der Relevanz, Effektivität und Umsetzbarkeit zu jeder Anforderung.

## 5.2 Designanforderungen an Notebooks

Entsprechend der Erkenntnisse aus den Untersuchungen der Fallstudie 1 (Kapitel 3.4) wird der Fokus bei Notebooks bei den nachfolgenden produktspezifischen Anforderungsoptionen insbesondere auf die Demontagefreundlichkeit in der Erstbehandlung gelegt, um eine Separierung der in relativ großer Menge enthaltenen Edel- und Sondermetalle zu ermöglichen (bspw. Kobalt aus Akkumulatoren, Neodym aus Festplatten). Kunststoffe stehen nicht im Vordergrund, da die Aussicht auf eine bessere Kreislaufführbarkeit durch spezifische Anforderungen als mäßig erfolgsversprechend eingeschätzt werden (vgl. insb. Demontageversuche Abbildung 28).

### 5.2.1 Batterien und Akkumulatoren

#### Entnehmbarkeit und Austauschbarkeit von Notebook-Akkumulatoren

Gemäß ElektroG § 4 (1) müssen Geräte so gestaltet sein, dass Altbatterien und Altakkumulatoren durch den Endnutzer oder vom Hersteller unabhängiges Fachpersonal problemlos entnommen werden können. Weiterhin müssen Batterien und Akkumulatoren gemäß ElektroG Anlage 4 b) aus getrennt erfassten Altgeräten entfernt werden (Kapitel 3.2.1). Die UBA-Empfehlungen zu Behandlungsanforderungen enthalten die Maßgabe, dass zugängliche, aber vom Altgerät umschlossene Altbatterien aus batteriebetriebenen Altgeräten, die nach § 14 Abs. 1 Satz 2 ElektroG im eigenen Behältnis getrennt

von anderen Altgeräten gesammelt wurden, verpflichtend vor einer mechanischen (Grob-) Zerkleinerung zu separieren sind. Für nicht zugängliche Altbatterien empfiehlt das UBA, dass diese während der Behandlung zerstörungsfrei zu separieren sind. Nach Entfernung sollen Altbatterien nach chemischen Systemen und Typengruppen untergliedert werden können (Umweltbundesamt 2017b).

Neben den gesetzlichen Bestimmungen ist die Entnahme von Lithium-Akkumulatoren aus elektronischen Geräten als potenzielles Gefahrgut ein wesentlicher Schritt in der Erstbehandlung. In Geräte integrierte Akkus erschweren die beschädigungsfreie Entnahme und erhöhen somit das Gefahrenpotential für die Mitarbeiter, das insbesondere durch das inhärente Brandrisiko von Akkumulatoren bei Beschädigungen, als auch die potentielle Freisetzung toxischer Stoffe (bspw. Produkte aus Reaktionen des Elektrolyten<sup>27</sup>) gegeben ist. Erfolgt die Entnahme eines Notebook-Akkumulators in der Erstbehandlung nicht, beispielsweise, weil die Gestaltung des Gerätes dies nicht problemlos in einer kurzen Zeitspanne ermöglicht, gelangt der Akku möglicherweise nicht in den optimalen Recyclingpfad einer dedizierten Batterierecyclinganlage. Die im Akku enthaltenen Ressourcen, insbesondere Kobalt, gehen dem stofflichen Recycling somit verloren.

Neben der Entnehmbarkeit von Akkumulatoren im Zuge der Erstbehandlung von Notebooks ist auch deren Austauschbarkeit im Laufe der Nutzungsphase ein relevanter Aspekt der Ressourceneffizienz und insbesondere der Abfallvermeidung. Die nutzbare Kapazität von Akkumulatoren nimmt ab dem Zeitpunkt der Herstellung und mit der Nutzung kontinuierlich ab (vgl. Kapitel 4.2.2). Akkumulatoren zählen damit zu den Verschleißteilen, die i.d.R. von der (umfangreichen) Herstellergarantie ausgenommen sind (vgl. Kapitel 3.4.6). Um ein Notebook mit einem Akkumulator mit stark verminderter Kapazität weitzunutzen zu können, muss der Nutzende in die Lage versetzt sein, diesen mit relativ geringem Zeit- und Kostenaufwand austauschen zu können, um die Nutzungsphase des Gesamtgerätes zu verlängern.

Die Erkenntnisse aus Kapitel 4.4.3 lassen darauf schließen, dass der Trend weg von manuell entnehmbaren und hin zu integrierten Akkumulatoren in der Produktgruppe Notebooks weiter zunehmen wird.

#### Anforderung 1: Entnehmbarkeit und Austauschbarkeit von Notebook-Akkumulatoren

Notebooks sollen so gestaltet werden, dass deren Akkumulatoren manuell (ohne Werkzeug) entnehmbar und austauschbar sind. Dies wird so definiert, dass der Akku ohne den Einsatz von Werkzeug reversibel aus dem Gerät entnommen werden kann. Zulässig sind nur lösbare Verbindungen, die ohne Werkzeug voneinander lösbar sind.

**Erläuterungen:** Stark adhäsive Klebstoffe erhöhen die Gefahr der Beschädigung der Zelle bei der Entnahme teilweise deutlich. Eine anwendbare Klassifizierung der Adhäsionsstärke von Klebverbindungen konnte im Rahmen dieses Forschungsvorhabens nicht ermittelt werden. Es wird empfohlen, das bestehende Normengerüst hinsichtlich einer anwendbaren Klassifizierung zu prüfen bzw. ggf. zu erweitern<sup>28</sup>.

**Relevanz:** Im Hinblick auf die in Kapitel 3.4.2 abgeschätzten Mengen an Sondermetallen in Notebook-Akkumulatoren (insb. Kobalt), die dem Recycling potentiell zur Verfügung stehen, wird die Relevanz einer möglichen Anforderung zur Erleichterung der Entnahme von Akkumulatoren aus Notebooks als

<sup>27</sup> <http://jes.ecsdl.org/content/163/6/A821.full>

<sup>28</sup> Bspw. DIN 53 293 (Prüfung von Metallklebstoffen; Bestimmung der Bindefestigkeit von einschnittig überlappten Klebungen im Zugversuch); DIN EN 1465 (Klebstoffe - Bestimmung der Zugscherfestigkeit von Überlappungsklebungen); ISO 14679 (Messung von Adhäsionsmerkmalen nach dem Dreipunkt Biegeverfahren); ISO 15107 (Bestimmung der Spaltfestigkeit von geklebten Fügeverbindungen); ISO 15108 (Bestimmung der Festigkeit von geklebten Fügeverbindungen unter Anwendung eines Biege-Scher Verfahren); ISO 15509 (Bestimmung der Klebefestigkeit von Klebeverbindungen aus technischem Kunststoff)

hoch eingeschätzt. Weiterhin wird ein klarer Trend zur Integration von Akkumulatoren in IKT Geräte einschließlich Notebooks gesehen. Eine marktgetriebene Umkehr dieses Trends ist aktuell nicht zu erwarten.

**Effektivität:** Die Designanforderung stellt die Erfüllung der eingangs genannten gesetzlichen Anforderungen an die Produktgestaltung als auch an die Behandlung von Altgeräten sicher. Dies verringert einerseits das beschriebene Gefahrenpotential durch Lithium-Akkumulatoren in der Erstbehandlung und erhöht andererseits die Wahrscheinlichkeit, dass die im Akku enthaltenen Edel- und Sondermetalle im fachgerechten Batterierecycling zurückgewonnen werden können.

Die höchste Effektivität der Anforderung auf die Ressourcenschonung ist unter der Ökodesign-Richtlinie gegeben, wenn alle in Verkehr gebrachten Notebooks die Anforderung erfüllen. Erstbehandlungsanlagen können zuverlässig davon ausgehen, dass der Akku aus Notebooks manuell entnehmbar ist. Nutzer können davon ausgehen, dass sich der Akku im Laufe der Nutzungsphase austauschen lässt, um die Lebensdauer des Gesamtgerätes zu verlängern. Hierfür ist jedoch die Verfügbarkeit von Ersatzteilen eine notwendige Voraussetzung.

Eine Implementierung der Anforderung unter freiwilligen Instrumenten wie dem Blauen Engel stellt sicher, dass nicht alle Hersteller den Trend zum Integrieren von Akkumulatoren in Notebooks bei allen Modellen umsetzen. Hier kann die umweltfreundliche öffentliche Beschaffung ein wichtiger ökonomischer Anreiz sein. Der zu erwartende Effekt auf die Ressourcenschonung ist jedoch deutlich geringer einzuschätzen als eine flächendeckende Implementierung unter der Ökodesign-Richtlinie.

**Umsetzbarkeit:** Die Anforderung ist überprüfbar. Um die Prüfung weiter zu erleichtern, kann begleitend die Anforderung gestellt werden, dass zu jedem Gerät eine bebilderte Anleitung zur Entnahme des Akkumulators verfügbar gemacht werden muss. Es wird darauf hingewiesen, dass die Maßnahme einen deutlichen Eingriff in die Gestaltungsfreiheit der Hersteller darstellt. Viele Notebooks, insbesondere im Privatkundenbereich, erfüllen die Anforderung zum aktuellen Zeitpunkt nicht. Daher kann von einer Kostensteigerung für die Hersteller ausgegangen werden. Die technische Umsetzbarkeit der Anforderung ist jedoch vielfach belegt. Eine technische Notwendigkeit für das Integrieren von Akkumulatoren in Notebooks wird nicht gesehen. Eine Wasserdichtigkeit ist, im Gegensatz zu anderen Produktgruppen wie z.B. Smartphones, nicht von höchster Priorität (ggf. mit Ausnahme der Tastatur).

Hersteller können Akkumulatoren nur in Geräte integrieren, wenn sie eine bestimmte Mindestlebensdauer aufweisen, so dass nicht bereits nach einer kurzen Nutzungsdauer ein Austausch durchgeführt werden muss. Es wird kein technischer Grund gesehen, dass ein manuell entnehmbarer Akku eine deutlich kürzere Lebensdauer aufweisen müsste, als ein integrierter Akku. Dennoch könnte es ratsam sein, eine parallele Anforderung an die technische Lebensdauer zu stellen, ggf. zumindest als Informationsanforderung (vgl. Kapitel 5.9.1).

### **Alternative Anforderung an die Entnehmbarkeit und Austauschbarkeit von integrierten Notebook-Akkumulatoren**

Wenn das Integrieren von Notebook-Akkumulatoren als Designentscheidung der Hersteller nicht reguliert werden soll, besteht dennoch die Möglichkeit, den Prozess der Entnahme (und Austausch) des Akkumulators durch Designmaßnahmen zu begünstigen. In den Demontageversuchen wurde festgestellt, dass oftmals das Lösen einer variierenden Anzahl an Schrauben des gleichen Typs (z.B. PH 00) ausreichte, um die Gehäuseunterseite der Notebooks zu separieren. Anschließend lagen die wesentlichen elektronischen Baugruppen i.d.R. frei. Die Feststellung der verschiedenen Verbindungstechniken durch einen Mitarbeiter einer Erstbehandlung und der Einsatz unterschiedlicher Werkzeuge macht den Prozess jedoch potentiell komplex und zeitaufwändig.

## Anforderung 2: Entnehmbarkeit und Austauschbarkeit von Notebook-Akkumulatoren

Notebooks mit integrierten Akkumulatoren sollen so gestaltet sein, dass

- ▶ der Prozess zur Entnahme des Akkumulators zerstörungsfrei und reversibel mit nur einem Universalwerkzeug durchgeführt werden kann (zulässig sind nur lösbare Verbindungen)
- ▶ das benötigte Werkzeug einheitlich für alle Notebooks verschiedener Hersteller eingesetzt werden kann (bspw. ein standardisierter Schraubkopfantrieb)
- ▶ [der Akkumulator in einem festen Gehäuse vorliegt]

**Erläuterungen:** Werden nur Schrauben eines Typs bei allen Notebooks eingesetzt, ist der Aufwand zur manuellen Demontage durch Erstbehandlungsanlagen vermindert, da das gleiche Werkzeug für alle Geräte eingesetzt werden kann. Es wird empfohlen, den Typ Phillips #00 (oder #0) als Standard vorzuschlagen, da dieser ohnehin in den meisten der untersuchten Notebooks eingesetzt wird. Klebstoffe erschweren das Öffnen von Gehäusen sowie die Entnahme des Akkumulators teilweise deutlich und sollten daher nicht eingesetzt werden. Akkumulatoren, die in einem festen Gehäuse anstatt nur durch Folien umwickelt im Gerät vorliegen, vermindern das Risiko einer Beschädigung im Prozess der Entnahme.

**Umsetzbarkeit:** Die Anforderung ist überprüfbar. Die Anforderung greift zwar deutlich in die Gestaltungsfreiheit der Hersteller ein, bildet jedoch ohnehin eine gängige Konstruktion von Notebooks mit integrierten Akkumulatoren ab. Der zusätzliche Aufwand zum im Designprozess der Geräte bei Herstellern wird daher als zumutbar angesehen. Eine eindeutige Definition für ein festes Gehäuse ist den Autoren nicht bekannt, dieser Passus wird daher mit Vorbehalt empfohlen. Es fehlt eine genaue Definition von Universalwerkzeug. Die Arbeiten unter dem Normungsmandat M/543 zur Ökodesign-RL könnten hier eine Festlegung bringen.

## Entnehmbarkeit (und Austauschbarkeit) von CMOS-Batterien

Neben dem Akkumulator als primärem Energiespeicher enthält die Mehrzahl der Notebooks eine Lithiumprimärzelle im Knopfformat, die das Speichern von BIOS-Parametern, wie Datums- und Uhrzeiteinstellungen, auch ohne Energiezufuhr durch eine externe Stromquelle oder der primären Gerätebatterie ermöglicht. Auch diese sogenannten CMOS-Batterien sollten im Sinne der Ressourceneffizienz einem dedizierten Batterierecyclingprozess zugeführt werden. Eine wesentliche Voraussetzung hierfür ist die Separierbarkeit von der Leiterplatte durch eine, nach DIN 8593-0, als lösbare Verbindung definierte Fügestelle. In der untersuchten Stichprobe an Notebook-Geräten (Kapitel 3.4.5) wurden, sobald die Leiterplatte frei lag, keine Probleme bei der Separierung der CMOS-Batterie festgestellt. Alle Batterien waren formschlüssig durch Einpressen, Anpressen oder Zusammensetzen auf der Leiterplatte aufgebracht und gelten somit nach DIN 8593-0 als lösbare Fügstellen. Nichtlösbare Verbindungen, wie sie beispielsweise durch stoffschlüssige Verbindungstechniken, wie das Fügen durch Lötens oder adhäsive Fügeverfahren wie das Kleben, entstehen können, wurden nicht verwendet. Dies ermöglicht, dass Batterien entweder problemlos manuell gelöst oder sich in einer mechanischen Behandlung von der Leiterplatte ablösen lassen. Eine denkbare technologische Entwicklung hin zu einer nichtlösbaren Integration der CMOS Batterie in die Leiterplatte, würde die Separierbarkeit einschränken und damit die separate Recyclingfähigkeit von CMOS-Batterien herabsetzen.

Da in der Regel Lithium-Primärzellen als CMOS-Batterien eingesetzt werden, ist die Lebensdauer dieser Zellen prinzipiell begrenzt. Dem Vorhaben lagen jedoch keine Daten zur durchschnittlichen Lebensdauer von CMOS-Batterien in Notebooks vor.

## Anforderung 3: Entnehmbarkeit (und Austauschbarkeit) von CMOS-Batterien

CMOS-Batterien, soweit vorhanden, sollen mit lösbaren Verbindungstechniken an der Leiterplatte von Notebooks befestigt werden.

**Relevanz:** Wie beschrieben, waren alle CMOS-Batterien der untersuchten Stichprobe mit lösbaren Fügestellen an der Leiterplatte angebracht. Die stoffliche Recyclingrelevanz wurde nicht hochgerechnet, da die im Vorhaben identifizierten Zielstoffe nicht in relevanten Mengen eingesetzt werden (i.d.R. kommen Zellen auf Basis von Manganoxid ohne Kobalt zum Einsatz). Zu einer Notwendigkeit, die CMOS Batterie im Laufe der Nutzungsphase austauschen zu müssen, standen dem Vorhaben keine Daten zur Verfügung.

**Effektivität:** Die Effektivität der Maßnahme ist vom angenommenen Recyclingszenario abhängig: Wird angenommen, dass Leiterplatten manuell vom Notebook getrennt werden, kann die Anforderung die Separierung der Knopfzelle unterstützen. In einer mechanischen Zerkleinerung des Notebooks nach einer Erstbehandlung ohne Entnahme der Leiterplatte kann angenommen werden, dass sich die CMOS Batterie durch die mechanische Einwirkung von der Leiterplatte ablöst. Auch in diesem Fall unterstützt die Anforderung die Separation. Der Einfluss auf die Ressourcenschonung wird jedoch von der weiteren Behandlung der Batterie, sowie der tatsächlichen Menge an verwendeten CMOS-Batterien in den Produkten, bestimmt (z.B. Separierung der Batterie vom Schreddergut zur Überführung zum dedizierten Batterierecycling). Es wird angemerkt, dass einzelne Hersteller Superkondensatoren auf dem Mainboard als Alternative zu Knopfzellen einsetzen. Diese Konfiguration ist zum aktuellen Zeitpunkt deutlich seltener als eine übliche Knopfzelle und wurde im Rahmen des Vorhabens nicht weiter untersucht. Es wird jedoch darauf hingewiesen, dass eine Regulierung im Sinne der Anforderung einen denkbaren Technologieschwenk zu Superkondensatoren nicht berührt.

**Umsetzbarkeit:** Die Anforderung ist prüfbar. Die Umsetzbarkeit ist vielfach technisch belegt.

## 5.2.2 Demontagefreundliche Konstruktion

### Öffnen von Gehäusen

Zur Öffnung des Gehäuses von Notebooks sind in der Regel Schrauben und teilweise Clips zu lösen. In der untersuchten Stichprobe kamen ausschließlich Schrauben des Typs PH 0 und PH 00 zum Einsatz. Eine durchgehende Standardisierung der verwendeten Schraubenkopfantriebe kann den Aufwand zum manuellen Öffnen der Gehäuse von Notebooks zum Erreichen der recyclingrelevanten, schad- bzw. wertstoffhaltigen Baugruppen vermindern. Dazu müssen die Schrauben visuell leicht zu lokalisieren sein. Der Einsatz zusätzlicher Verbindungstechniken, wie Klebstoffe oder Clips, erschwert den Vorgang.

#### Anforderung 4: Standardisierung der verwendeten Schraubenkopfantriebe

Hersteller von Notebooks sollen nur einen Typ Schraubenkopfantrieb zum Verschluss des Gehäuses verwenden. Alle zum Öffnen des Gehäuses zu lösenden Schrauben müssen gut sichtbar und zugänglich sein.

**Relevanz:** Die Relevanz der Anforderung liegt insbesondere in der potentiellen Vereinfachung der Entnahme von integrierten Akkumulatoren, als auch in der Erleichterung der Vorbereitung zur Wiederverwendung von elektronischen Baugruppen (bspw. Arbeitsspeicher, Massenspeicher) im Zuge der Erstbehandlung.

**Effektivität:** Die Anforderung kann den gewünschten positiven Effekt nur erzielen, wenn ein Großteil der bei der Erstbehandlung eingehenden Notebooks diese gleichermaßen erfüllen. Daher wird eine Umsetzung nur unter der Ökodesign-Richtlinie als sinnvoll erachtet.

**Umsetzbarkeit:** Die Anforderung ist überprüfbar. Die Geräte in der untersuchten Stichprobe kamen mit zwei verschiedenen Schraubenkopfantrieben aus. Eine Reduzierung auf einen Schraubentyp sollte prinzipiell keine technischen Schwierigkeiten erzeugen, jedoch greift die Anforderung erheblich in die Gestaltungsfreiheit der Hersteller ein. Eine branchenweite Vereinheitlichung kann zu erheblichem Abstimmungsbedarf unter den betreffenden Unternehmen führen.

## Entnehmbarkeit von Komponenten aus Notebooks zur Wiederverwendung

Unter Gesichtspunkten der Vorbereitung zur Wiederverwendung von Komponenten im Zuge der Erstbehandlung, als auch der Reparierbarkeit und Aufrüstfähigkeit von Notebooks in der Nutzungsphase, ist ein einfach gestalteter Prozess zur (reversiblen) Entnahme der relevanten Baugruppen vorteilhaft. In der Praxis ist jedoch ein Trend zur vermehrten Integration von Baugruppen, wie dem Massenspeicher und Arbeitsspeicher, durch das Aufbringen der Baugruppen Mainboard mittels Lötverbindungen zu beobachten (Kapitel 3.4.6).

In den Demontageversuchen wurde der Prozess besonders erleichtert, wenn eine Wartungsklappe vorhanden war. Diese ist vor allem dann sinnvoll, wenn der Akkumulator manuell entnehmbar ist und ein Öffnen des Gehäuses zur Entnahme dessen nicht notwendig ist. Wartungsklappen sind i.d.R. mit nur zwei Schrauben montiert und demnach in kurzer Zeit vom Gerät reversibel lösbar.

### Anforderung 5: Entnehmbarkeit von Komponenten aus Notebooks zur Wiederverwendung

Notebooks sollen so gestaltet sein, dass sich Massenspeicher, Arbeitsspeicher, und dedizierte Grafikkarten, soweit vorhanden, mit Universalwerkzeug zerstörungsfrei [reversibel] entnehmen lassen. Zulässig sind nur lösbare Verbindungen, die mit Universalwerkzeug zerstörungsfrei lösbar sind.

**Relevanz:** Die Wiederverwendung ist gemäß § 6 des Kreislaufwirtschaftsgesetzes dem Recycling vorzuziehen. Damit ist eine Begünstigung der Entnehmbarkeit von Komponenten zur Wiederverwendung eine relevante Maßnahme. Angesichts der prognostizierten Anzahl an Notebooks, die in den kommenden Jahren in den Markt eingehen werden und dem entsprechenden Geräteaufkommen im Recycling (Kapitel 3.4.1), als auch im Hinblick auf den andauernden Trend hin zur Integration elektronischer Baugruppen, wird die Relevanz der Anforderungen als gegeben angesehen.

**Effektivität:** Die Effektivität der Anforderung hängt vom Vorgehen der Behandlungsanlagen in der Praxis ab. Wenn ein ökonomischer Anreiz oder eine entsprechende Behandlungsanforderung gegeben ist, kann die Anforderung zur Ressourcenschonung beitragen.

**Umsetzbarkeit:** Die Anforderung ist überprüfbar. Es kann weiterhin gefordert werden, jedem Gerät eine bebilderte Anleitung zur Entnahme der Baugruppen beizulegen, um die Prüfung zu erleichtern. Es existieren am Markt ausreichend Produktbeispiele von Subnotebooks, welche trotz der dünnen Bauweise gesteckte RAM Bausteine und SSDs einsetzen, statt diese direkt auf das Mainboard zu löten. Es fehlt eine genaue Definition von Universalwerkzeug. Die Arbeiten unter dem Normungsmandat M/543 zur Ökodesign-RL könnten hier eine Festlegung bringen.

### 5.2.3 Massenspeicherlaufwerke

#### Entnehmbarkeit von Festplattenlaufwerken aus Notebooks

Festplatten (HDD) enthalten einen Massenanteil von ca. 0,6 Prozent Neodym. Demnach ergibt sich ein abgeschätztes Potential von 3,7 Tonnen Neodym aus Notebook-Festplatten in den Jahren 2020 und 2025. Der UBA Entwurf zu Behandlungsanforderung enthält die folgende Maßgabe: „Separation SE-haltiger Magneten mindestens aus Linearmotoren von Festplatten [...] als separater Stoffstrom und Zuführung zu einem Verwertungsverfahren. Für Festplatten, die aus Gründen des Datenschutzes zerstört werden, gilt dies nur, sofern es die zeitlichen Vorgaben an die Datenvernichtung erlauben“ (Umweltbundesamt 2017b).

Die untersuchte Stichprobe in den Demontageversuchen (Kapitel 3.4.5) zeigte, dass vier von neun Notebooks mit einer Wartungsklappe ausgestattet waren, die den Zugang zur Festplatte durch das Lösen von lediglich ein bis zwei Schrauben ermöglichte. Bei den fünf weiteren untersuchten Notebooks war die Festplatte durch die Separation der Gehäuseunterseite erreichbar.

### Anforderung 6: Entnehmbarkeit von Festplattenlaufwerken aus Notebooks

Notebooks sollen so gestaltet sein, dass sich Festplatten, soweit vorhanden, mit Universalwerkzeug entnehmen lassen. Dies schließt das Öffnen der Notebooks und die Entnahme der Festplattenlaufwerke ein. Zulässig sind nur lösbare Verbindungen, die mit Universalwerkzeug zerstörungsfrei lösbar sind.

**Relevanz:** Die Relevanz der Designanforderung auf die Kreislaufführbarkeit ist von der Entwicklung der Marktanteile von Festplatten mit HDD Technologie und SSD Technologie im Notebook-Markt abhängig. Marktdaten zeigen diesen Trend bezogen auf den Massenspeichermarkt insgesamt, konkret für den Notebook-Markt liegen dem Vorhaben jedoch keine Daten vor. Es wird angenommen, dass der Marktanteil an HDD-Festplatten auch im Notebooksegment weiter abnimmt. Elwert et al. (2017) prognostiziert eine Abnahme der Ausstattung von PCs, Laptops und Spielkonsolen mit magnethaltigen Festplatten von 94 Prozent im Jahr 2012 auf 0 Prozent im Jahr 2028. Die mittelfristige Relevanz und Notwendigkeit der Regulierung kann somit in Frage gestellt werden.

**Effektivität:** Die Anforderung stellt eine einfache Entnehmbarkeit der Festplatte in der Erstbehandlung sicher. Die Effektivität der Anforderung auf die Kreislaufführbarkeit von Neodym ist im Wesentlichen von den zur Verfügung stehenden Recyclingprozessen für Neodym-haltige Materialien abhängig.

**Umsetzbarkeit:** Die Anforderung ist überprüfbar. Es fehlt eine genaue Definition von Universalwerkzeug. Die Arbeiten unter dem Normungsmandat M/543 zur Ökodesign-RL könnten hier eine Festlegung bringen.

### Datenlöschung von Notebook-Massenspeicherlaufwerken

Ein Hindernis zur Wiederverwendung von Massenspeicherlaufwerken wie Festplatten und Halbleiterspeichern sind Bedenken hinsichtlich Datenschutz. Um zu vermeiden, dass Unternehmen wie Erstbehandlungsanlagen vor diesem Hintergrund dazu verpflichtet sind, Massenspeicherlaufwerke physisch zu zerstören, ist es vorteilhaft, wenn eine Datenvernichtung technisch eindeutig belegbar gewährleistet werden kann.

### Anforderung 7: Datenlöschung von Notebook-Massenspeicherlaufwerken

Hersteller sollen sicherstellen, dass die vorhandenen Daten auf Notebook-Massenspeicherlaufwerken (z.B. HDD, SSD) mit marktüblicher Software nachweislich unwiderruflich gelöscht werden können bzw. eine Datenverschlüsselung erfolgt und die Löschung des Schlüssels den Zugriff auf Daten unmöglich macht.

**Relevanz:** Im Sinne der Vorbereitung zur Wiederverwendung von Massenspeicherlaufwerken ist die Möglichkeit für eine verlässliche Datenlöschung notwendig.

**Effektivität:** Die Effektivität der Anforderung hängt vom Vorgehen der Behandlungsanlagen in der Praxis ab. Wenn ein ökonomischer Anreiz oder eine entsprechende Behandlungsanforderung gegeben ist, kann die Anforderung zur Ressourcenschonung beitragen.

**Umsetzbarkeit:** Es ist unklar, ob eine nachweislich unwiderrufliche Löschung ohne physische Zerstörung der Laufwerke tatsächlich möglich ist. Hier muss die Sicherheit der Datenlöschung gegen den benötigten Aufwand einer Wiederherstellung der gelöschten Daten abgewogen werden. Das Forschungsvorhaben konnte sich nicht tiefergehend mit diesem Thema befassen. Zu diesem Zeitpunkt wird daher eine Selbstverpflichtung der Hersteller unter der Ökodesign-Richtlinie als sinnvoll erachtet, da die technische Kompetenz bei den Herstellern liegt, als auch bei Unternehmen, die sich auf die Bereitstellung entsprechender Software zur Datenlöschung spezialisieren.

## 5.2.4 Displays

### Entnehmbarkeit der PMMA Boards aus Notebook-Displays

Notebook LCD-Displays enthalten einen Massenanteil von knapp 20 Prozent PMMA. Es ergibt sich ein abgeschätztes Potential von knapp unter 500 Tonnen PMMA aus Notebook-Displays in den Jahren 2020 und 2025 (Kapitel 3.4.2). Bezogen auf Bildschirmgeräte (z.B. TVs, Monitore) enthalten die UBA-Empfehlungen zu Behandlungsanforderungen die Maßgabe zur „*Separierung der PMMA- und PC-Scheiben von FBS-Geräten und werkstoffliche Verwertung*“ (Umweltbundesamt 2017b). Es ist denkbar, diese Behandlungsanforderung auf Notebooks auszuweiten.

Im Produktdesign wird zum aktuellen Zeitpunkt kein Hinderungsgrund für eine Entnahme im Zuge der Erstbehandlung gesehen, da die PMMA Scheiben in der Displayeinheit bei den untersuchten Geräten durch das Lösen von Klips separiert werden konnten. Eine Anforderung an das Produktdesign wird daher zu diesem Zeitpunkt nicht formuliert. Ein interessanter Ansatzpunkt könnte hier jedoch das Einführen von standardisierten Größen von PMMA Scheiben für Notebooks mit bestimmten Displaygrößen und Seitenverhältnissen (Display Aspect Ratio) sein, um eine potentielle Wiederverwendung zu ermöglichen.

### Rückgewinnung von Indium aus Notebook-Displays

Notebook LCD-Displays enthalten einen Massenanteil von ca. 0,1 Prozent Indium, hauptsächlich in der Indiumzinnoxid (indium tin oxide, ITO) Schicht, die als Elektrode die Ausrichtung der Flüssigkristalle durchführt. Es ergibt sich ein abgeschätztes Potential von 0,6 Tonnen Indium aus Notebook-Displays in den Jahren 2020 und 2025. Im Vergleich dazu wird im Altgeräteaufkommen von Flachbildschirmfernsehern mit bis zu 5,5 Tonnen im Jahr 2025 gerechnet. Das Projekt UPgrade (vgl. Kapitel 3.3.2) empfiehlt eine Fokussierung für die Rückgewinnung von Indium nicht auf Geräte mit relativ kleinen Displays (Smartphones, Notebooks), sondern mit großen Displays (z.B. LCD TVs ab 32 Zoll Bildschirmdiagonale).

Im Produktdesign wird zum aktuellen Zeitpunkt kein Hinderungsgrund für die Entnahme des Displaypanels gesehen. Eine Anforderung wird daher zu diesem Zeitpunkt nicht formuliert. Ein interessanter Ansatz kann eine Behandlungsanforderung an die (zerstörungsfreie) Entnahme des Displaypanels und anschließender Lagerung sein, um eine mögliche zukünftige Rückgewinnung von Indium im industriellen Maßstab vorzubereiten (vgl. auch Kapitel 3.3.1).

## 5.2.5 Mainboard

Laut ElektroG Anlage 4 (zu § 20 Absatz 2) müssen Leiterplatten ab einer Größe von 10 cm<sup>2</sup> aus getrennt erfassten Altgeräten entfernt werden. Die UBA-Empfehlungen für Behandlungsanforderungen sehen vor, dass Leiterplatten aus Notebooks (Laptops) vor der mechanischen (Grob-)Zerkleinerung verpflichtend, vorrangig manuell, andernfalls nach Grobaufschluss, separiert werden (Umweltbundesamt 2017b). Leiterplatten sind ein wesentlicher ökonomischer Treiber der Recyclingaktivitäten im Elektronikschrottbereich (Kapitel 3.2.4). Die Verbringung eines möglichst großen Anteils der Leiterplattenmasse aus EAG von der Erstbehandlungsanlage in fachgerechte Recyclingpfade wird daher als gegeben angesehen.

Wie in Kapitel 3.4.5 beschrieben, sind Mainboards ein integraler Bestandteil des Notebooks und daher mit vielen Baugruppen verbunden, als auch mit Gehäuseelementen verschraubt. Eine manuelle (zerstörungsfreie) Separierung ist daher nur mit verhältnismäßig großem Aufwand möglich. Aus praktischen Erwägungen kann der Standpunkt vertreten werden, dass Leiterplatten nicht zwangsläufig aus Kunststoffgehäusen separiert werden müssen. Wie in Kapitel 3.4.5 beschrieben (insb. Abbildung 28), sind Kunststoffgehäuseelemente von Notebooks ohnehin kaum recyclingfähig. Damit ist es denkbar, dass das Mainboard gemeinsam mit anderen elektronischen Baugruppen (CPU, RAM, SSD, Kühleinheit,

usw.) und etwaigen Gehäuseelementen in der Kupferhütte zur Rückgewinnung von Edelmetallen verwertet wird. Eine spezifische Anforderung an das Produktdesign wird daher zu diesem Zeitpunkt nicht formuliert.

### 5.2.6 Weitere Anforderungen

Weitere Anforderungen können aus den Kapiteln zu produktübergreifenden Anforderungen entnommen und auf Notebooks angewendet werden. Dies trifft insbesondere auf weitergehende Anforderungen an Akkumulatoren zu, bspw. Aspekte der Lebensdauer (Kapitel 5.9) als auch auf diverse materialbezogene Anforderungen, bspw. eine potentielle Recyclingquote oder den Einsatz von Kunststoffrezyklaten (Kapitel 5.8).

## 5.3 Designanforderungen an Smartphones

Bei Smartphones wird der Fokus insbesondere auf die Entnehmbarkeit des Akkumulators in der Erstbehandlung gelegt um die stoffliche Rückgewinnung der enthaltenen Edel- und Sondermetalle zu fördern. Die weiteren enthaltenen Edel- und Sondermetalle sind mehrheitlich in den Leiterplatten konzentriert und werden i.d.R. als Ganzes in Kupferhütten verwertet. Hier wird der Einfluss der entsprechenden Recyclingprozesse gegenüber dem Produktdesign als bedeutender betrachtet. Analog zu Notebooks liegt der Fokus nicht auf Kunststoffen, da die Aussicht auf ein stoffliches Recycling aufgrund der geringen Massenanteile und der geringen, inhärenten stofflichen Recyclingfähigkeit der eingesetzten Werkstoffe als wenig erfolgsversprechend angesehen wird. Für ein stoffliches Recycling relevanter sind die teilweise eingesetzten metallischen Werkstoffe (z.B. Aluminiumlegierungen als Gehäusewerkstoffe). Hier ist jedoch aktuell ein Trend von Metallen hin zu Glas am Markt erkennbar.

### 5.3.1 Akkumulatoren

Die in Kapitel 5.2.1 ausgeführte Argumentationsgrundlage zur Entnehmbarkeit und Austauschbarkeit von Akkumulatoren aus Notebooks gilt im Prinzip ebenso für Smartphones. Dementsprechend muss bei einer Berücksichtigung der Recyclingfähigkeit sowie der Reparierbarkeit die Empfehlung lauten, dass Akkus aus Smartphones manuell entnehmbar sein sollen. Es treffen jedoch einige produktgruppenspezifische Besonderheiten zu, die berücksichtigt werden müssen. Hier ist vor allem der Zielkonflikt zwischen Modularität von Smartphones und ihrer Robustheit zu nennen. Hier ist abzuwägen, ob der diskutierte Schutz vor dem Eindringen von Flüssigkeiten, als bedeutender Aspekt für die Lebensdauer von Smartphones, oder die Entnehmbarkeit des Akkus im Recycling prioritär behandelt werden soll. Es wird jedoch erneut darauf hingewiesen, dass die technische Umsetzbarkeit eines manuell entnehmbaren Akkumulators und einer wasserdichten Konstruktion im Sinne einer IP67-Zertifizierung gegeben und durch marktrelevante Modelle belegt ist (vgl. Abbildung 35).

Es kann angenommen werden, dass die technische Lebensdauer von Smartphone-Akkumulatoren mindestens für eine erste Nutzungsphase von zwei bis drei Jahren ausreichend ist (vgl. Kapitel 4.5.2). Dennoch verlieren die Akkumulatoren mit zunehmendem Alter und zunehmender Nutzung unausweichlich an umsetzbarer Kapazität (Kapitel 4.2.2). In einer Zweit- oder Drittnutzung kann ein integrierter Akkumulator damit zu einer potentiell lebensdauerbegrenzenden Komponente werden, insbesondere, wenn keine qualitativ hochwertigen Ersatzakkumulatoren am Markt verfügbar sind.

Eine einfache Entnehmbarkeit als auch Austauschbarkeit von Smartphone-Akkumulatoren ist damit aus kreislaufwirtschaftlicher Sicht eine sinnvolle Designmaßnahme. Der Trend hin zu integrierten Akkumulatoren in Smartphones ist eindeutig belegt (Kapitel 4.5.3). Zum aktuellen Zeitpunkt ist keine marktgetriebene Umkehr dieses Trends erkennbar.

## Entnehmbarkeit und Austauschbarkeit von Smartphone-Akkumulatoren

### Anforderung 8: Entnehmbarkeit und Austauschbarkeit Smartphone-Akkumulatoren

Smartphones sollen so gestaltet werden, dass Akkumulatoren manuell (ohne Werkzeug) entnehmbar und austauschbar sind. Zulässig sind nur lösbare Verbindungen, die manuell und zerstörungsfrei lösbar sind.

**Erläuterungen:** Der Einsatz von Klebstoffen zum Versiegeln der Gehäuseelemente und zur Befestigung des Akkumulators im Gerät müssen nicht kategorisch ausgeschlossen werden, solange sie einer manuellen Entnahme (ohne Werkzeug) nicht im Wege stehen, d.h. Klebverbindungen müssen ohne Wärmeeinwirkung oder chemische Lösungsmittel manuell leicht lösbar sein. Stark adhäsive Klebstoffe erhöhen die Gefahr der Beschädigung der Zelle bei der Entnahme deutlich. Eine anwendbare Klassifizierung der Adhäsionsstärke von Klebverbindungen konnte im Rahmen dieses Forschungsvorhabens nicht ermittelt werden. Es wird empfohlen, das bestehende Normengerüst hinsichtlich einer anwendbaren Klassifizierung zu prüfen bzw. ggf. zu erweitern.

**Relevanz:** Die Relevanz ergibt sich insbesondere aus dem abgeschätzten Altgeräteaufkommen in den Jahren 2020 und 2025 (Kapitel 3.5.1) und dem entsprechenden Recyclingpotential insbesondere für Kobalt (Kapitel 3.5.2). Durch das beträchtliche Altgeräteaufkommen werden die Erstbehandlungsanlagen potentiell vor große Herausforderungen gestellt. Eine Umsetzung der Designanforderung unter der Ökodesign-Richtlinie würde sicherstellen, dass Akkumulatoren stets entnommen und dem fachgerechten Batterierecycling zugeführt werden können. Analog zu Notebooks wird die Effektivität einer Umsetzung unter einem freiwilligen Instrument wie dem Blauen Engel als erheblich geringer, aber auch leichter umsetzbar, eingeschätzt.

**Effektivität:** Die Designanforderung stellt die Erfüllung der eingangs genannten gesetzlichen Anforderungen an die Produktgestaltung, als auch an die Behandlung von Altgeräten sicher. Dies verringert einerseits das beschriebene Gefahrenpotential durch Lithium-Akkumulatoren in der Erstbehandlung und erhöht andererseits die Wahrscheinlichkeit, dass die im Akku enthaltenen Edel- und Sondermetalle im fachgerechten Batterierecycling zurückgewonnen werden können. Weiterhin wird der Austausch von Akkumulatoren in der Nutzungsphase durch den Nutzenden zur Verlängerung der Lebensdauer der Geräte ermöglicht. Eine einfache Austauschbarkeit von Smartphone-Akkumulatoren kann nur dann die Lebensdauer des Gesamtgerätes verlängern, wenn der Nutzende einfachen Zugriff auf Ersatzteile zu einem angemessenen Preis hat.

**Umsetzbarkeit:** Die Anforderung ist überprüfbar. Analog zu Notebooks wird auch an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass zum aktuellen Zeitpunkt die Mehrheit der marktrelevanten Geräte die Anforderung nicht erfüllt. Gehäuseelemente sind in der Regel mit Klebstoff versiegelt. Wie beschrieben ist eine IP67-Zertifizierung auch mit manuell entnehmbarem Akkumulator umsetzbar. In Marktrecherchen konnte ebenfalls ein nach IP68 zertifiziertes Smartphone mit entnehmbarem Akku eines marktführenden Herstellers identifiziert werden.

### Alternative Anforderung an die Entnehmbarkeit von Smartphone-Akkumulatoren

Das oben beschriebene Gefahrenpotential wird vermindert, wenn der Akku in einem festen Gehäuse vorliegt, anstatt in der Form von einer oder mehrerer flexibler Pouchzellen, die lediglich mit Folien umwickelt sind und dementsprechend leicht beschädigt werden können. Weiterhin sorgt eine leichte Separierbarkeit vom Gerät für eine Verminderung des Gefahrenpotentials, was durch das Vermeiden von nichtlösbaren Verbindungen begünstigt werden kann.

## Anforderung 9: Entnehmbarkeit von Smartphone-Akkumulatoren

Integrierte Smartphone-Akkumulatoren sollen in einem festen Gehäuse vorliegen und mit Universalwerkzeug aus dem Gerät entnehmbar sein. Zulässig sind nur lösbare Verbindungen.

**Erläuterungen:** Die Anforderung richtet sich spezifisch an den Prozess der Entnahme des Akkumulators, unabhängig vom Prozess der Öffnung des Gehäuses. Durch das Vorliegen des Akkumulators in einem festen Gehäuse kann das Gerät als solches im Recyclingprozess zerstörend demontiert werden. Wie in Kapitel 3.5.7 diskutiert, sind Klebstoffe in ihren technischen Charakteristika sehr vielfältig. Verkleben bedeutet nicht zwangsläufig, dass ein Akku nicht entnehmbar ist. Dennoch erhöht der Einsatz stark adhäsiver Klebstoffe eine Beschädigung des Akkus bei der Entnahme deutlich.

**Effektivität:** Mögliche Schwierigkeiten in der Erstbehandlung sowie beim Austausch des Akkumulators in der Nutzungsphase, wie das Öffnen des Smartphone-Gehäuses zum Erreichen des Akkumulators, werden durch die Anforderung nicht direkt adressiert. Dennoch wird davon ausgegangen, dass neben der Entnahme im EoL, auch der Austausch in der Nutzungsphase durch die Anforderung erleichtert wird. Es kann angenommen werden, dass der potentielle positive Effekt auf die Ressourcenschonung im Vergleich zu Anforderung 8 geringer ausfällt. Die Effektivität der Maßnahme wird ebenfalls unter der Ökodesign-Richtlinie am höchsten eingeschätzt.

**Umsetzbarkeit:** Die Anforderung ist nur dann prüfbar, wenn eine klare Definition für den Begriff „festes Gehäuse“ verfügbar ist. Das Gehäuse erfüllt den Zweck, die Batteriezellen vor Beschädigungen zu schützen, und muss daher schlecht biegsam und schwer zu durchstoßen sein. Eine entsprechende Norm konnte zu diesem Aspekt jedoch nicht identifiziert werden.

### Information über die Austauschbarkeit des Akkumulators

Um Konsumenten über die Austauschbarkeit von Smartphone-Akkumulatoren zu informieren, legt die Durchführungsmaßnahme für Computer unter der Ökodesign-Richtlinie seit Juli 2014 fest, dass Hersteller, sollte ein Akkuaustausch durch den Nutzer nicht vorgesehen sein, dies auf der Geräteverpackung angegeben müssen (vgl. Kapitel 4.4.1). Diese Informationsanforderung kann potentiell auf weitere Produktgruppen ausgeweitet werden. Ein interessanter Vorschlag für eine Kennzeichnung ist weiterhin im Entwurf für neue Anforderungen im Rahmen der Revision der Vorstudie zu Computern unter der Ökodesign-RL (Maya-Drysdale et al. 2017) zu finden. Es soll ein Label verwendet werden, dass dem potentiellen Kunden folgende Information anzeigt:

- ▶ Label 1: Der Akkumulator ist durch den Nutzenden ohne Werkzeug entnehmbar und austauschbar
- ▶ Label 2: Akkumulator ist mittels Werkzeugen entnehmbar und austauschbar
- ▶ Label 3: Für den Austausch des Akkumulators wird ein Fachservice benötigt

Da die Anforderung keine Relevanz für das Recycling hat, wird in diesem Bericht darauf nicht näher eingegangen.

### 5.3.2 Demontagefreundliche Konstruktion

#### Einsatz lösbarer Verbindungstechniken

Insbesondere Smartphones der neueren Generationen sind häufig mit stark adhäsiven Klebstoffen versiegelt. Teilnehmer des Begleitkreises bestätigten, dass diese Designentscheidung dem Schutz vor dem Eindringen von Fremdkörpern und Flüssigkeiten dient. Die Versiegelung stellt jedoch eine wesentliche Hürde in der Erstbehandlung als potentiell auch im Reparaturprozess dar.

### Anforderung 10: Einsatz lösbarer Verbindungstechniken

Smartphones sollen so gestaltet sein, dass keine unlösbare Verbindung eine Öffnung des Geräts und die Entnahme recycling- und reparaturrelevanter Komponenten (insb. Akkumulator, Display) verhindern.

**Relevanz:** Die Relevanz ist aufgrund der vielfach eingesetzten unlösbaren Verbindungen (insbesondere Stark adhäsive Klebverbindungen) gegeben.

**Effektivität:** Prinzipiell dient die Anforderung am ehesten einer verbesserten Reparierbarkeit. Im Fall einer manuellen Demontage unterstützt die Anforderung auch die Behandlung im Recycling. Es sei jedoch erwähnt, dass auch nicht alle lösbaren Verbindungen eindeutig problemlos lösbar sind. Beispielsweise können Clips, also formschlüssige Verbindungen, teilweise leicht beim Öffnen abbrechen.

**Umsetzbarkeit:** Die Anforderung ist anhand der genannten Norm überprüfbar. Ein großer Teil der marktrelevanten Smartphones erfüllt die Anforderung zum aktuellen Zeitpunkt jedoch nicht. Es wird ein potentieller Zielkonflikt mit der Robustheit und damit Langlebigkeit von Smartphones gesehen, da die Versiegelung i.d.R. auch dem Schutz gegen das Eindringen von Flüssigkeiten und Festkörpern im Sinne einer IP-Zertifizierung dient.

### Vereinheitlichung der verwendeten Schraubentypen

Es werden je Gerät teilweise unterschiedliche Schraubentypen eingesetzt, was den Aufwand des Demontageprozesses verschiedener Geräte in der Erstbehandlung deutlich erhöht. Weiterhin werden teilweise Schrauben eingesetzt, deren Material zu weich ist, um mehrere Schraubvorgänge zu ermöglichen. Dies ist insbesondere für Reparaturvorhaben in der Nutzungsphase problematisch.

### Anforderung 11: Standardisierung der verwendeten Schraubkopfantriebe

Hersteller von Smartphones sollen nur einen Typ Schraubkopfantrieb, soweit vorhanden, zum Verschluss des Gehäuses verwenden. Alle zum Öffnen des Gehäuses zu lösenden Schrauben müssen gut sichtbar und zugänglich sein. Die Schrauben sollen so konzipiert sein, dass mehrere Schraubvorgänge (mehrfaches Lösen und Festziehen) möglich sind.

**Erläuterungen:** Die Anforderung meint eine modell- und herstellerübergreifende Vereinheitlichung der verwendeten Schraubkopfantriebe.

**Relevanz:** Die abgeschätzten Stückzahlen an Smartphones, die in den kommenden Jahren zu Altgeräten werden sind enorm. Die Vielfalt der eingesetzten Verbindungstechniken bei Smartphones wird die Erstbehandlungsanlagen voraussichtlich vor große Herausforderungen stellen. Für Reparaturvorhaben insbesondere durch Endnutzer sind der Einsatz verschiedener und untypischer Schraubkopfantriebe und insbesondere der Einsatz von Schrauben aus weichen Metallen ein Hindernis.

**Effektivität:** Die Anforderung kann den gewünschten positiven Effekt nur erzielen, wenn ein Großteil der bei der Erstbehandlung eingehenden Smartphones diese gleichermaßen erfüllen. Daher wird eine Umsetzung nur unter der Ökodesign-Richtlinie als sinnvoll erachtet.

**Umsetzbarkeit:** Es besteht im Vergleich zu den anderen untersuchten Produktgruppen eine große Vielfalt der eingesetzten Verbindungstechniken und Schraubentypen in Smartphones. Die Anforderung ist ein Eingriff in die Gestaltungsfreiheit der Hersteller. Es wird eine anwendbare Norm benötigt um die Härte des eingesetzten Materials bei Schrauben zu definieren.

### Standardisierung der Konstruktion von Smartphones

Die maschinelle Demontage von Smartphones ist ein Konzept, das von mehreren Herstellern verfolgt wird. In der Erstbehandlung wird das Problem gesehen, dass die vielen unterschiedlichen, am Markt

verfügbaren Modelle keinen einheitlichen internen Aufbau aufweisen und Einzellösungen eines Herstellers die konstruktive Bandbreite der verschiedenen Smartphonemodelle kaum bedienen kann. Ein denkbarer Ansatz dazu ist eine Standardisierung des generellen Aufbaus von Smartphones zum Zweck der maschinellen Trennung von Komponenten mit verschiedenen Recyclingpfaden. Es wird verwiesen auf die beiden generellen Ansätze im internen Aufbau von Smartphones (Kapitel 3.5.5 insb. Abbildung 39). Weiterhin wird verwiesen auf die technische Lösung für die Zerlegung von Flachbildschirmfernsehern im Projekt InAccess (vgl. Kapitel 3.3.1).

Eine maschinelle, zerstörende Zerlegung von Smartphones wäre möglich, wenn alle Geräte einem Ansatz folgen würden – beispielsweise, wenn der Akku nicht in den oberen/unteren 20 Prozent des Gehäuses platziert wäre, das Mainboard oberhalb und eventuelle Daughterboard(s) unterhalb des Akkus. Ein solcher Ansatz ermöglicht prinzipiell eine maschinelle Demontage mit hohem Durchsatz mittels der entsprechenden Ausrüstung, stellt jedoch einen tiefen Eingriff in den Gestaltungsspielraum der Hersteller dar und wird daher nur dann als umsetzbar angesehen, wenn die Industrie der Treiber ist. Eine Anforderung an das Produktdesign wird daher nicht formuliert.

### 5.3.3 Weitere Anforderungen

Weitere Anforderungen können aus den Kapiteln zu produktübergreifenden Anforderungen entnommen und auf Smartphones angewendet werden. Dies trifft insbesondere auf weitergehende Anforderungen an Akkumulatoren zu, bspw. Aspekte der Lebensdauer (Kapitel 5.9) als auch auf diverse materialbezogene Anforderungen, bspw. eine Recyclingfähigkeitsquote (Kapitel 5.8.5).

Die im Folgenden aufgelisteten Problemstellungen lagen nicht im Fokus des Forschungsvorhabens (geringe Recyclingrelevanz) und wurden daher nicht eingehender untersucht. Es handelt sich um Erkenntnisse, die im vorliegenden Forschungsvorhaben zusammengetragen wurden, und als relevant für die produktbezogene Materialeffizienz erachtet werden. Für eine Einführung wären diese jedoch noch vertieft zu analysieren.

- ▶ Laden von Li-Ion-Akkumulatoren mit hoher C-Rate ist tendenziell ein negativer Faktor für die Lebensdauer. Bei Smartphones sollte der Nutzende daher die Geschwindigkeit des Ladevorgangs beeinflussen können. So wird nur eine Schnellladung durchgeführt, wenn diese aus Sicht des Nutzenden notwendig erscheint.
- ▶ Glasbruch ist bei Smartphones die häufigste Beschädigung. Displaymodule oder das Displayglas als solches sollten daher möglichst einfach tauschbar sein. Weiterhin ist es vor dem gleichen Hintergrund wünschenswert, dass Hersteller bei Auslieferung der Geräte bereits ein zusätzliches Sicherheitsglas auf das Displayglas aufbringen, das der Nutzende optional entfernen kann, oder ein solches Glas, das beim Kauf optional kostenlos erstanden werden kann. Den Autoren ist bewusst, dass die Branche kontinuierlich an härterem/bruchsicherem Glas und Alternativen arbeitet, bspw. Saphirglas oder Kunststoffen als Glasersatz.
- ▶ Die Rückseitenabdeckung von Smartphones wird vermehrt aus Glas gefertigt. Hintergrund dafür ist unter anderem, dass induktives (kabelloses) Laden des Akkumulators ermöglicht werden soll, ohne dass auf Kunststoff als Material zurückgegriffen werden muss (nicht möglich mit Metall). Wie oben beschrieben, ist Glasbruch der häufigste Schadensfall bei Smartphones. In einem solchen Fall sollte der Hersteller bei Auslieferung eine Schutzhülle beilegen, um die Rückseite vor Beschädigungen zu schützen.
- ▶ Geräteteile, die hoher mechanischer Beanspruchung ausgesetzt sind, bspw. Anschlüsse und Knöpfe, sollten nicht direkt mit dem Mainboard verbunden sein, damit im Reparaturfall leichter ausgetauscht werden kann (interne Modularität).
- ▶ Software- Obsoleszenz ist ein Thema, das vermehrt in den Vordergrund tritt. Smartphones werden i.d.R. nur für eine begrenzte Zeitspanne mit Updates seitens der Hersteller versorgt (oftmals werden 2 Jahre Updates des Betriebssystems und ein weiteres Jahr Sicherheitsup-

dates angeboten). Hier kann eine längere Unterstützung mit Updates für Smartphones eingefordert werden. Nachdem der Hersteller keine Updates mehr anbietet, sollte er dafür sorgen, dass das Gerät durch Drittanbietern weiterhin leicht mit Betriebssystem-Updates versorgt werden kann (bspw. Lineage-OS<sup>29</sup> für Android Geräte).

## 5.4 Designanforderungen an Flachbildschirm-TVs

### 5.4.1 Kunststoffgehäuse

Wie in Kapitel 3.6.5 dargestellt, werden in Kunststoffgehäusen der Flachbildschirmfernseher der untersuchten Stichprobe im Wesentlichen nur drei Basispolymere bzw. Polymerblends (ABS, PC-ABS und HIPS) eingesetzt. Glasfaserverstärkte Kunststoffe kommen oftmals in Frontrahmen zum Einsatz. Flammenschutzmittel werden laut Kunststofftypenkennzeichnung in der Mehrheit der Gehäuseelemente eingesetzt. Die Recyclingfähigkeit ist daher nach dem aktuellen Stand der Technik nur sehr begrenzt gegeben. Prozesse, die eine stoffliche Rückgewinnung auch von flammgehemmten Kunststoffen ermöglichen (bspw. CreaSolv<sup>®</sup>), sind aktuell noch nicht in industriellem Maßstab etabliert.

Unter dem Gesichtspunkt der Begrenzung der Materialvielfalt wird die folgende Anforderung vorgeschlagen. Der Fokus liegt dabei zunächst nur auf der Rückwand, da diese im Durchschnitt der untersuchten Geräte 64 Prozent (zwischen 42 und 88 Prozent) des Masseanteils am Gesamtgehäuse ausmachte.

#### Anforderung 12: Materialauswahl bei Rückwänden von Flachbildschirmfernsehern

Die Rückwand von Flachbildschirmfernsehern soll aus nur einem (Co-)Polymer(blend) bestehen. Die Zugabe von Additiven, die den Recyclingprozess behindern (insbesondere Glas- und Carbonfaser), ist nicht zulässig.

**Relevanz:** Die abgeschätzten Mengen an Gehäusekunststoffen von Flachbildschirmfernsehern, die in den kommenden Jahren zu Altgeräten werden, ist beträchtlich. Eine Vorbereitung der Produktgruppe auf zukünftige Recyclingprozesse, die auch flammgehemmte Kunststoffe stofflich zurückgewinnen können, wird daher als sinnvoll angesehen.

**Effektivität:** Die Anforderung kann den gewünschten positiven Effekt nur erzielen, wenn Recyclingprozesse für flammgehemmte Kunststoffe im Industriemaßstab etabliert sind oder Flammhemmer für die Gehäuse von Fernsehgeräten obsolet werden. Die Ökodesign-RL wird als die effektivste Möglichkeit gesehen, den Stoffstrom im Recycling flächendeckend für Recyclingprozesse zu optimieren.

**Umsetzbarkeit:** Die Anforderung ist überprüfbar anhand der Kunststoffkennzeichnung sowie messtechnischem Nachweis der stofflichen Zusammensetzung.

### 5.4.2 Displays

#### Entnehmbarkeit der PMMA Scheiben aus Flachbildschirmfernsehern

Displaymodule von LED-LCD Flachbildschirmfernsehern enthalten einen Massenanteil von knapp 20 Prozent PMMA. Es ergibt sich ein abgeschätztes Potential von über 7048 bzw. 9361 Tonnen PMMA aus Flachbildschirm-Displays in den Jahren 2020 und 2025 (Kapitel 3.6.2).

<sup>29</sup> Webseite zum Android-Betriebssystem LineageOS: <https://lineageos.org/>

Bezogen auf Bildschirmgeräte enthalten die UBA-Empfehlungen zu Behandlungsanforderungen die Maßgabe zur „*Separierung der PMMA- und PC-Scheiben von FBS-Geräten und werkstoffliche Verwertung*“.

Im Produktdesign wird zum aktuellen Zeitpunkt kein Hinderungsgrund für eine Entnahme im Zuge der Erstbehandlung gesehen, da die PMMA Scheiben in der Displayeinheit jeweils durch das Lösen von Clips separiert werden konnten. Eine Anforderung an das Produktdesign wird daher zu diesem Zeitpunkt nicht formuliert. Ein interessanter Ansatzpunkt könnte hier jedoch das Einführen von standardisierten Größen von PMMA Scheiben für TVs mit bestimmten Displaygrößen und Seitenverhältnisse (Display Aspect Ratio) sein, um eine potentielle Wiederverwendung zu ermöglichen.

### **Indium Recycling**

LCD-Displays von Flachbildschirm-TVs enthalten einen Massenanteil von 0,1 Gewichtsprozent Indium, hauptsächlich in der ITO Schicht, die als Elektrode die Ausrichtung der Flüssigkristalle durchführt. Es ergibt sich ein abgeschätztes Potential von 4,1 und 5,5 Tonnen Indium aus TV Displays in den Jahren 2020 und 2025. Die für das Altgeräteaufkommen abgeschätzte Menge Indium aus FSB-TVs liegt damit um ein Vielfaches über dem aus Notebooks oder Smartphones. Eine Regulierung für TVs wird daher als sinnvoll erachtet. Das Projekt UPgrade (vgl. Kapitel 3.3.2) empfiehlt eine Fokussierung für die Rückgewinnung von Indium auf Geräte mit relativ großen Displays (z.B. LCD TVs ab 32 Zoll Bildschirmdiagonale). Im Produktdesign wird zum aktuellen Zeitpunkt kein Hinderungsgrund für die (zerstörende) Entnahme des Displaypanels gesehen. Eine Anforderung wird daher zu diesem Zeitpunkt nicht formuliert.

Nach aktuellem Erkenntnisstand findet in der Praxis kein Recycling von Indium statt. Ein interessanter Ansatz kann daher eine Behandlungsanforderung an die (zerstörungsfreie) Entnahme des Displaypanels und anschließender Lagerung sein, um eine mögliche zukünftige stoffliche Rückgewinnung von Indium im industriellen Maßstab vorzubereiten (vgl. auch Kapitel 3.3.1).

### **5.4.3 Weitere Anforderungen**

Da bis heute noch viele Altgeräte anfallen, in denen quecksilberhaltige Beleuchtungsröhren (CCFL-LCD) oder cadmiumhaltige Leuchtschichten enthalten sind, die aufgrund ihres Gefährdungspotenzials entnommen werden müssen, erfolgt die Zerlegung häufig manuell oder teil-automatisiert. Dies ermöglicht es, die Gehäuseelemente weitgehend am Stück zu separieren, um an die zu separierenden Hintergrundbeleuchtung zu gelangen. Die großen Gehäuseelemente könnten als „Beifang“ nach erfolgreicher Identifikation in nach Kunststoffarten getrennte Sammelboxen separiert werden. Dem Wechsel zu LED-Hintergrundbeleuchtung bzw. OLED Technologie entsprechend werden die Stückzahlen der CCFL-LCD TV in Erstbehandlungsanlagen kurz- bis mittelfristig deutlich abnehmen bzw. verschwinden. Es wird daher vorgeschlagen, eine weitere Anforderung an die Behandlung von FSB TVs zu stellen: FSB TVs müssen (weiterhin) vor mechanischer (Grob-)Zerkleinerung demontiert werden. So wird die Separation wesentlicher Komponenten (Displaypanel, PMMA Scheiben, Gehäuserückwand) begünstigt. Diese Anforderung wurde jedoch im Forschungsvorhaben noch nicht vertieft analysiert. Dies wird vor einer Einführung empfohlen.

Die im Folgenden aufgelisteten Problemstellungen liegen nicht im Fokus des Forschungsvorhabens (geringe Recyclingrelevanz) und wurden daher nicht eingehender untersucht. Es handelt sich um Erkenntnisse, die im vorliegenden Forschungsvorhaben zusammengetragen wurden, und durch ihren potentiell lebensdauerverlängernden Charakter als relevant erachtet werden und für eine Einführung jedoch noch vertieft zu analysieren wären.

- ▶ Leere Steckplätze im Design lassen (Vorbereitung eines Upgrades zur potentiellen Verlängerung der Lebensdauer, bspw. beim Wechsel auf einen neuen Standard der Funkübertragung wie DVB-T2)

- ▶ Netzteile nicht im Gerät integrieren, um im Fall eines Defektes den einfachen Austausch zu ermöglichen
- ▶ Netzteilbauelemente nicht auf Mainboard integrieren (interne Modularität)
- ▶ Bei modularen OLED-TV: Standardisierung von Steckverbindern (Bildschirm-, Ton- u. Rechen-einheit) fordern, bevor sich der Markt diversifiziert (aktuelle Dominanz eines Herstellers nutzen)

## 5.5 Designanforderungen an Schreibtischdrucker

### 5.5.1 Kunststoffgehäuse

#### Werkstoffauswahl bei Kunststoffgehäusen von Tintenstrahldruckern

In der untersuchten Stichprobe wurde festgestellt, dass die Gehäuse von Tintenstrahldruckern einen Großteil der Gesamtmasse der Geräte ausmachen und oftmals nur aus einem Basispolymer wie HIPS oder ABS bestehen (Kapitel 3.7.5). Weiterhin werden laut Kunststoffkennzeichnung bei Tintenstrahldruckern keine Flammenschutzmittel oder sonstige Additive eingesetzt, die die Dichte des Werkstoffs verändern. Dementsprechend wird angenommen, dass Kunststoffgehäuse von Tintenstrahldruckern prinzipiell gut für das stoffliche Recycling geeignet sind. Aus Sicht der Ressourceneffizienz ist es wünschenswert, dass dieser positive Aspekt beibehalten und weiter verstärkt wird.

#### Anforderung 13: Werkstoffauswahl bei Kunststoffgehäusen von Tintenstrahldruckern

Kunststoffgehäuseteile von Tintenstrahldruckern sind nur aus einem, recyclingfähigen (Co-) Polymer oder Polymerblend (Thermoplast) zu fertigen. Als initiale, erweiterungsfähige Positivliste werden die folgenden recyclingfähigen Kunststoffe vorgeschlagen: ABS, PS und PP. Stoffschlüssiges Aufbringen von Komponenten aus anderen Werkstoffen, wie Etiketten und Gumminoppen, ist nicht zulässig.

**Erläuterungen:** Die Anforderung ermöglicht die Erweiterung der initialen Positivliste bei guter Begründung durch Hersteller, um Innovationen im Bereich recyclingfähiger Polymerwerkstoffe nicht zu kompromittieren. Der Zusatz von FSM und sonstigen Additiven sollte vermieden werden, um die Fraktionierung mittels Schwimm-Sink-Verfahren nicht zu behindern.

**Relevanz:** Die Relevanz ergibt sich aus den hochgerechneten Stoffmengen an Gehäusekunststoffen aus Tintenstrahldrucker.

**Effektivität:** Die Anforderung stellt die werkstoffliche Recyclingfähigkeit der Gehäusekunststoffe von Tintenstrahldruckern sicher.

**Umsetzbarkeit:** Die Anforderung richtet sich spezifisch an Tintenstrahldrucker. Aufgrund der erhöhten Wärmeentwicklung in Laserdruckern kann eine flammenschutzmittelfreie Konstruktion nicht ohne detailliertere Untersuchungen empfohlen werden. Entsprechend wird für Laserdrucker eine alternative Anforderung formuliert.

### 5.5.2 Demontagefreundliche Konstruktion

Schreibtischdrucker werden laut den Teilnehmern des Begleitkreises in Erstbehandlungsanlagen nicht manuell vorbehandelt, mit der Ausnahme der Entnahme von Resttonerbehältern aus Laserdruckern. Die Demontageversuche belegen den im Vergleich zu den anderen untersuchten Produktgruppen besonders komplexen und uneinheitlichen internen Aufbau der Geräte. Durch den relativ geringen zu erwartenden Erlös durch enthaltene Wertstoffe in Schreibtischdruckern ist der Aufwand einer weitergehenden manuellen Demontage für Erstbehandlungsanlagen ökonomisch nicht gerechtfertigt.

## Separierbarkeit der Glasplatte

Multifunktionsgeräte besitzen immer eine Glasplatte, die optische Funktionen wie Scannen und Kopieren ermöglicht. Die Glasplatten in den untersuchten Geräten ließen sich jeweils erst nach dem Öffnen der umgebenden Gehäuseelemente separieren (Kapitel 3.7.5). Laut den Erstbehandlungsanlagen aus dem Teilnehmerkreis würden Glasplatten aus Druckern auch dann nicht manuell aus den Geräten separiert, wenn sie immer leicht entnehmbar wären. Denkbare negative Auswirkungen von Glas, beispielsweise bezogen auf Anlagen der mechanischen Zerkleinerung, wurden nicht bestätigt. Die teilnehmenden Kunststoffrecyclingunternehmen berichteten über Probleme mit Glasfasern, die den Recyclingprozess erschweren bzw. die Qualität der Sekundärrohstoffe vermindern, nicht jedoch über Probleme mit sonstigen Glasfraktionen.

Eine Anforderung an die Separierbarkeit der Glasplatten in Multifunktionsdruckern wird demnach nicht formuliert. Ein interessanter Ansatzpunkt könnte hier jedoch das Einführen von standardisierten Größen der Glasscheiben für Multifunktionsgeräte bestimmter Größenklassen sein, um eine potentielle Wiederverwendung zu ermöglichen.

### 5.5.3 Weitere Anforderungen

Weitere Anforderungen können aus den nachfolgenden Kapiteln entnommen und auf Schreibtischdrucker angewendet werden. Dies betrifft insbesondere weitergehende materialbezogene Anforderungen, bspw. eine Recyclingfähigkeitsquote und den Einsatz von Kunststoffrezyklaten (Kapitel 5.8).

Die im Folgenden aufgelisteten Problemstellungen lagen nicht im Fokus des Forschungsvorhabens (geringe Recyclingrelevanz) und wurden daher nicht eingehender untersucht. Es handelt sich um Erkenntnisse, die im vorliegenden Forschungsvorhaben zusammengetragen wurden, und durch ihren potentiell lebensdauerverlängernden Charakter, als relevant erachtet werden und die vor Einführung noch genauer zu analysieren wären.

- ▶ Der Support mit Treiber durch die Hersteller stellt die Kompatibilität der Geräte mit Betriebssystemen sicher. Ein langer Supportzeitraum (z.B. 10 Jahre) stellt sicher, dass Geräte nicht nur aufgrund fehlender Treiber obsolet werden.
- ▶ Modularer Aufbau von Tintenstrahldruckern, der die Möglichkeit vorsieht, defekte oder eingetrocknete Druckköpfe zu tauschen.
- ▶ Netzteile sollten, wie bei Notebooks die Regel, nicht im Gerät verbaut werden, so dass ein Austausch im Bedarfsfall problemlos durch den Nutzenden möglich ist.
- ▶ Die Tintenauffangbehälter (bzw. Resttintenreservoir/-schwämmchen), sollten problemlos durch den Nutzenden ausgetauscht werden können, um zu vermeiden, dass sie zu einer frühzeitigen Entsorgung eines ansonsten funktionsfähigen Gerätes führen (vgl. Kapitel 3.7.6).

## 5.6 Designanforderungen an E-Book-Reader

Die Untersuchungen an E-Book-Readern beschränkten sich auftragsgemäß auf Fragestellungen um die Entnehmbarkeit, Austauschbarkeit und Lebensdauer von Akkumulatoren.

### 5.6.1 Entnehmbarkeit, Austauschbarkeit und Lebensdauer von Akkumulatoren aus E-Book-Readern

Bei E-Book-Readern gilt die gleiche Argumentationskette wie für Notebooks oder Smartphones (vgl. Kapitel 5.2.1 und 5.3.1). Wie in Kapitel 4.6.3 dargelegt, sind Akkus bei E-Readern i.d.R. nicht ohne Werkzeug entnehmbar oder austauschbar. Es wird angenommen, dass die Hintergründe dazu ähnlich gelegen sind, wie bei Smartphones. Dies schließt insbesondere den Schutz vor dem Eindringen von Flüssigkeiten und Fremdkörpern ein. Wie die Untersuchungen mit Smartphones gezeigt haben, schließen sich ein manuell entnehmbarer bzw. austauschbarer Akkumulator und die Wasserdichtigkeit

nicht zwingend aus. Ebenfalls kann der ausreichend vorhandene Platz im Gerät als Chance angesehen werden, Akkus mit festem Gehäuse einzusetzen (vgl. Abbildung 75).

#### Designanforderung 14: Entnehmbarkeit und Austauschbarkeit von E-Book-Reader-Akkus

E-Book-Reader sollen so gestaltet werden, dass deren Akkumulatoren manuell entnehmbar und austauschbar sind. Zulässig sind nur lösbare Verbindungen.

**Relevanz:** Es liegen dem Forschungsvorhaben keine Daten zur Lebensdauer von Akkumulatoren aus E-Book-Readern vor. Aufgrund des Nutzungsmusters ist die Beanspruchung (Ladehäufigkeit), im Vergleich zu anderen mobilen IKT Geräten, wie Notebooks und Smartphones, als gering einzuschätzen. Es wird daher angenommen, dass der Akkumulator nur bedingt eine lebensdauerbegrenzende Komponente in E-Book-Readern ist. Wie in Kapitel 4.2.2 beschrieben, schreitet aber auch bei geringer Nutzung der Verlust an speicherbarer Kapazität durch die kalendarische Alterung der Lithium-Ionen-Zellen voran. Weiterhin wird das Risiko einer Tiefentladung des Akkumulators als vergleichsweise höher als bei Notebooks oder Smartphones eingeschätzt, bspw. wenn ein E-Book-Reader nach vollständiger Entladung für eine längere Zeit nicht genutzt wird. Dies kann zu einem frühzeitigen Ausfall des Akkumulators führen.

**Effektivität:** Die Anforderung stellt die Entnehmbarkeit in der Erstbehandlung als auch die Austauschbarkeit in der Nutzungsphase sicher. Neben der Ökodesign-Richtlinie könnte der Blaue Engel ein Signal setzen, dass Konsumenten darüber informiert, ob Geräte mit wechselbaren Akkumulatoren ausgestattet sind.

**Umsetzbarkeit:** Die aktuell am Markt verfügbaren Geräte sind in der großen Mehrheit mit integrierten Akkus ausgestattet. Es wird angenommen, dass die Integration der Akkus eine wasser- und staubdichte Konstruktion der Geräte erleichtert. Während ein hoher Schutz gegen das Eindringen von Flüssigkeiten und Feststoffen die Lebensdauer der Geräte potentiell verlängert, kann andererseits argumentiert werden, dass ein Schutz vor dem Eindringen von Wasser und Fremdkörpern im Sinne einer IP67 Zertifizierung als ausreichend gelten müsste (30 min, 1 m). Im Gerät ist ausreichend Platz für Designänderungen vorhanden, ohne dass die Dimensionen deutlich geändert werden müssten.

Eine alternative Handlungsoption ist es, die Informationsanforderungen bzgl. der Entnehmbarkeit von Akkumulatoren von Notebooks auf E-Book-Reader zu übertragen, um den Nutzenden über die fehlende Austauschbarkeit zu informieren.

## 5.7 Designanforderungen an elektrische Zahnbürsten

Die Untersuchungen an elektrischen Zahnbürsten beschränkten sich auftragsgemäß auf Fragestellungen um die Entnehmbarkeit, Austauschbarkeit und Lebensdauer von Akkumulatoren.

### 5.7.1 Entnehmbarkeit, Austauschbarkeit und Lebensdauer von Akkumulatoren aus elektrischen Zahnbürsten

Bei elektrischen Zahnbürsten gilt die gleiche Argumentationskette wie bei den vorherigen Produktgruppen. Wie in Kapitel 4.7.3 dargelegt, sind Akkus bei elektrischen Zahnbürsten i.d.R. nicht ohne Werkzeug entnehmbar oder austauschbar. Der Zweck für eine Versiegelung der Geräte ist dem Schutz vor dem Eindringen von Flüssigkeiten zuzuordnen, da Zahnbürsten naturgemäß im Nassbereich genutzt werden und direkt mit Wasser in Kontakt treten. Weiterhin sind die eingesetzten Akkumulatoren i.d.R. im Gerät direkt mit der Leiterplatte verlötet. Wie die Arbeiten jedoch belegt haben, sind auch bei Zahnbürsten mit integriertem Akkumulator Mechanismen zum Öffnen der Gehäuse im Produktdesign vorgesehen.

### Anforderung 15: Entnehmbarkeit und Austauschbarkeit bei elektrischen Zahnbürsten

Elektrische Zahnbürsten sollen so gestaltet werden, dass Akkumulatoren zerstörungsfrei manuell [alternativ: mit Universalwerkzeug] entnehmbar und austauschbar sind. Zulässig sind nur lösbare Verbindungen.

**Relevanz:** Es liegen dem Forschungsvorhaben keine Daten zur Lebensdauer von Akkumulatoren aus elektrischen Zahnbürsten vor. Im Vergleich zu mobilen IKT Geräten ist die Beanspruchung (Ladehäufigkeit) als gering einzuschätzen. Es wird daher angenommen, dass der Akkumulator nur bedingt eine lebensdauerbegrenzende Komponente in elektrischen Zahnbürsten ist. Wie in Kapitel 4.2.2 beschrieben, schreitet aber auch bei geringer Nutzung, speziell bei hohen Ladezuständen der Verlust an speicherbarer Kapazität durch kalendarische Alterung der Lithium-Ionen-Zellen voran.

**Effektivität:** Die Anforderung stellt die Entnehmbarkeit in der Erstbehandlung, sowie die Austauschbarkeit in der Nutzungsphase, sicher. Eventuelle negative Auswirkungen der Anforderung auf die Lebensdauer der Geräte konnten nicht untersucht werden. Es ist denkbar, dass eine der Anforderung folgende Konstruktionsweise den Schutz vor dem Eindringen von Flüssigkeiten nicht im gleichen Maße gewährleisten kann.

**Umsetzbarkeit:** Integrierte Akkumulatoren sind bei E-Zahnbürsten die Regel; Geräte mit wechselbarem Akkumulatoren sind am Markt kaum erhältlich. Wasserdichtigkeit besonders relevant wegen der Nutzung im Nassbereich (z.B. Abspülen unter fließendem Wasser). Es ist jedoch festzustellen, dass es ebenso elektrische Zahnbürsten mit austauschbaren Batterien gibt.

## 5.8 Produktgruppenübergreifende Anforderungen

Die folgenden Anforderungen zielen nicht auf eine spezifische Produktgruppe ab. Sie können teilweise auf alle relevanten EEG angewendet oder zur Regulierung bestimmter Produktgruppen herangezogen werden.

### 5.8.1 Entnehmbarkeit von Gerätebatterien

Die Entnahme von Akkumulatoren aus EAG ist ein wesentlicher und gesetzlich vorgeschriebener Schritt in der Erstbehandlung von batteriebetriebenen Geräten. Für Erstbehandlungsanlagen wird es zunehmend problematisch, batteriebetriebene Geräte zu identifizieren, insbesondere bei integrierten Akkumulatoren (vgl. Kapitel 4.2.3). Dementsprechend steigt die Wahrscheinlichkeit von Fehleinschätzungen mit der Konsequenz, dass Batterien und Akkumulatoren bei der Erstbehandlung nicht aus Geräten separiert werden und damit für ein fachgerechtes stoffliches Recycling verloren gehen. Eine produktgruppenübergreifende Anforderung an die Separierbarkeit von Gerätebatterien aus EAG wird daher als sinnvoll erachtet. Diese kann aufgrund der grundlegenden Unterschiede in der Produktgestaltung verschiedener Produktgruppen nur unspezifisch formuliert werden.

### Anforderung 16: Entnehmbarkeit und Austauschbarkeit von Batterien und Akkumulatoren aus EEG

Gerätebatterien und -akkumulatoren müssen grundsätzlich manuell, d.h. ohne Werkzeug, entnehmbar und austauschbar sein. Zulässig sind nur lösbare Verbindungstechniken. Ausnahmen sind nur dann zulässig, wenn nachgewiesen werden kann, dass mindestens einer der in §4 (3) ElektroG genannten Gründe zutrifft.

Der Hersteller muss begründen, inwiefern ein oder mehrere der Ausnahmefälle auf sein Gerät zutreffen. Begründungen werden öffentlich bspw. auf der Produktwebseite, im Gerätehandbuch oder auf der Geräteverpackung angegeben. Ebenfalls wäre ein formales Vorgehen denkbar, in welchem Ausnahmeanträge durch den Hersteller gestellt und individuell auf Zulässigkeit geprüft werden.

Die Begründungen für Ausnahmen sollten, soweit möglich, an bestehende Standards und Normen angebunden werden. Beispiel Sicherheit: Bei Geräten, die aus Gründen der Sicherheit vor dem Eindringen von Flüssigkeiten geschützt konstruiert sein müssen, muss die Wasserdichtigkeit durch eine IP-Zertifizierung belegt werden. Dabei gilt ein durch das Gerät zu erfüllender Mindeststandard (bspw. IP5X oder IPX6).

### **Anforderung an die maximale Zeitdauer der Entnahme von (Batterien und) Akkumulatoren**

Eine technologieneutrale Möglichkeit, die Entnehmbarkeit von Batterien und Akkumulatoren in der Entsorgung zu gewährleisten, ist die Maßgabe eines Zeitfensters, in dem sich diese aus EAG entnehmen lassen müssen.

#### **Anforderung 17: Entnehmbarkeit von Batterien und Akkumulatoren aus EAG**

EEG sollten so gestaltet werden, dass enthaltene Batterien und Akkumulatoren von einer einzelnen Person innerhalb von 20 Sekunden mittels Universalwerkzeug zerstörungsfrei vom Gerät separiert werden können. Hersteller müssen den Vorgang mittels Videodokumentation belegen. Maschinen sind zulässig, wenn sie nachweislich eine festzulegende Mindestbandbreite der relevanten Produktgruppen im Markt behandeln können.

**Erläuterungen:** Das Zeitfenster wurde auf Basis von Informationsaustausch mit Recyclingunternehmen des Begleitkreises festgelegt. Der Begriff „zerstörungsfrei“ bezieht sich auf den Akku selbst, nicht jedoch zwangsläufig auf das Gesamtgerät. (Teil-)automatisierte Lösungen sollen nicht ausgeschlossen werden, sollen jedoch eine Mindestbandbreite an Geräten am Markt behandeln können. Dies soll vermeiden, dass Erstbehandlungsanlagen eine große Anzahl verschiedener Maschinen zur Entnahme von Akkumulatoren der großen Vielfalt der in den Markt eingehenden Geräte vorhalten muss. Eine solche Lösung kann nur dann effektiv sein, wenn eine Mindestbandbreite der in den Markt eingehenden Geräte damit behandelt werden können. Die konkrete Mindestbandbreite bedarf der Diskussion.

**Effektivität:** Die Effektivität der Maßnahme auf die Ressourcenschonung ist in Frage zu stellen. Es ist denkbar, dass unabhängig vom Gerätedesign nachgewiesen werden kann, dass unter den richtigen Umständen (z.B.: Prozess ist bekannt und eingeübt) prinzipiell jegliche Gerätebatterie im vergebenen Zeitfenster mit Universalwerkzeug entnommen werden kann. Die Frage die sich dabei stellt ist jedoch, welche Relevanz dieser Nachweis für die Praxis in Recyclingbetrieben hat. Die Anforderung zieht die Reparierbarkeit bzw. den Akkuwechsel nicht mit in Betracht. Es kann angenommen werden, dass ein professioneller Fachservice den Akku unabhängig vom Produktdesign tauschen kann, was für den Verbraucher jedoch mit entsprechenden Kosten verbunden ist. Die Austauschbarkeit des Akkumulators durch den Nutzenden wird durch die Anforderung nicht erleichtert.

**Umsetzbarkeit:** Der Vorteil dieser Maßnahme ist die Technologieneutralität, die keine konkreten Technologien oder Designentscheidungen vorschreibt oder verbietet. Die Anforderung kann auf andere Gerätegruppen und andere Baugruppen (z.B. Leiterplatten) übertragen werden. Es fehlt eine genaue Definition von Universalwerkzeug. Die Arbeiten unter dem Normungsmandat M/543 zur Ökodesign-RL könnten hier eine Festlegung bringen.

Eine Anforderung an die maximale Anzahl an Arbeitsschritten, die durchgeführt werden müssen um Gerätebatterien zu entnehmen, wurde im Vorhaben eruiert aber nicht weiterverfolgt, da hier besonders großer Aufwand zur Standardisierung gesehen wird, bspw. zur Definition eines Arbeitsschrittes.

## **5.8.2 Demontagefreundliche Konstruktion**

### **Öffnen des Gehäuses**

Zur Öffnung des Gehäuses vieler EEG (inkl. TVs, Drucker, Notebooks) sind in der Regel Schrauben und teilweise Clips zu lösen. In den untersuchten Stichproben kamen mehrheitlich Schrauben des Typs PH

0 und PH 00 zum Einsatz. Eine durchgehende Standardisierung der verwendeten Schraubenkopfantriebe kann den Aufwand zum manuellen Öffnen von EAG zum Erreichen der recyclingrelevanten schad- bzw. wertstoffhaltigen Baugruppen vermindern. Dazu müssen die Schrauben visuell leicht zu lokalisieren und mit Universalwerkzeug zu erreichen sein (z.B. sollten Schrauben nicht mit Etiketten überklebt sein).

#### Anforderung 18: Standardisierung der verwendeten Schraubenkopfantriebe

Hersteller von EEG sollen nur einen Typ Schraubenkopfantrieb zum Verschluss der Kunststoffgehäuse [je Produktgruppe / je Sammelgruppe] verwenden. Alle zum Öffnen des Gehäuses zu lösenden Schrauben müssen gut sichtbar und mit Werkzeug zugänglich sein. [Technisch notwendige Ausnahmen müssen begründet werden].

**Relevanz:** Die Relevanz der Anforderung liegt insbesondere in der potentiellen Vereinfachung der Schadstoffentfrachtung (bspw. Entnahme von integrierten Akkumulatoren), der Separierung von werthaltigen Komponenten (bspw. Leiterplatten) als auch in der Erleichterung der Vorbereitung zur Wiederverwendung von elektronischen Baugruppen (bspw. Arbeitsspeicher, Massenspeicher) im Zuge der Erstbehandlung.

**Effektivität:** Die Anforderung kann den gewünschten positiven Effekt nur erzielen, wenn alle bei der Erstbehandlung eingehenden EEG diese gleichermaßen erfüllen. Daher wird eine Umsetzung nur unter der Ökodesign-Richtlinie als sinnvoll erachtet.

**Umsetzbarkeit:** Die Anforderung ist prüfbar. Die Geräte in der untersuchten Stichprobe kamen mit wenigen Schraubenkopfantrieben aus. Eine Reduzierung auf einen Schraubentyp könnte beispielsweise je Produktgruppe oder je Sammelgruppe erfolgen.

#### Entnehmbarkeit von Komponenten aus EAG zur Wiederverwendung

Unter Gesichtspunkten der Separierbarkeit von Komponenten im Zuge der Erstbehandlung von EAG ist eine leichte Entnehmbarkeit wiederverwendbarer Komponenten erstrebenswert. Im Rahmen der Nutzungsphase der Geräte ist eine reversible Entnehmbarkeit (Austauschbarkeit) im Zuge von bspw. Reparatur und Aufrüstung vorteilhaft.

#### Anforderung 19: Entnehmbarkeit von Komponenten zur Wiederverwendung

Geräte sollen so gestaltet sein, dass sich zur Wiederverwendung relevante Komponenten, soweit vorhanden, mit Universalwerkzeug zerstörungsfrei entnehmen lassen. Dies schließt das Öffnen des Gehäuses und die Entnahme der Komponenten ein. Zulässig sind nur lösbare Verbindungen.

**Erläuterung:** Die Zielkomponenten müssen je Produktgruppe spezifiziert werden. Bei Notebooks können dies beispielsweise Massenspeicher, Arbeitsspeicher, dedizierte Grafikkarten und weitere Steckkarten sein.

**Relevanz:** Die Relevanz erschließt sich angesichts des mittelfristigen Aufkommens an EAG in Behandlungsanlagen, als auch im Hinblick auf den andauernden Trend hin zur weiteren Integration von Baugruppen.

**Effektivität:** Die Effektivität hängt einerseits von der Anzahl an Produktgruppen ab, auf welche die Anforderung angewandt wird und andererseits davon, ob im Zuge der Erstbehandlung tatsächlich Komponenten zur Wiederverwendung entnommen werden.

**Umsetzbarkeit:** Die Anforderung ist überprüfbar. Die technische Umsetzbarkeit ist für jede Produktgruppe einzeln zu ermitteln.

### 5.8.3 Entnehmbarkeit von Leiterplatten

Die wesentlichen Mengen an Edel- und Sondermetallen in elektronischen Geräten befinden sich in der Regel in der Leiterplatten bzw. den Leiterplatten. Aus den Arbeiten des Umweltbundesamtes zu Behandlungsanforderungen (Umweltbundesamt 2017b) geht hervor, dass hochwertige Leiterplatten (Klassen 1 und 2) oftmals manuell aus Geräten separiert werden, während weniger werthaltige Leiterplatten nicht vor einer mechanischen Zerkleinerung aus Geräten separiert werden. Eine Separierung der Leiterplatten vor mechanischer (Grob-)Zerkleinerung stellt eine Minimierung der Verluste an Wertstoffen in der Behandlungskette sicher. Die UBA-Empfehlungen zu Behandlungsanforderungen sehen die Entnahme von leiterplattenhaltigen definierten Zielgeräten (u.a. Notebooks, Smartphones, Tablets, Flachbildschirmgeräte) für eine verpflichtende Leiterplatten-Separation möglichst vor mechanischer (Grob-)Zerkleinerung vor: „Zu separierende Bauteile: Leiterplatten aus [...] Altgeräten, vorrangig manuell, andernfalls nach schonendem Grobaufschluss“ (Umweltbundesamt 2017b).

Eine produktgruppenübergreifende Anforderung an das Produktdesign zur Förderung der Separierbarkeit von Leiterplatten aus EAG wird daher als sinnvoll erachtet. Diese kann aufgrund der grundlegenden Unterschiede in der Produktgestaltung verschiedener Produktgruppen nur unspezifisch formuliert werden.

Der zeitliche Aufwand, der in der Behandlung betrieben werden muss, um die Leiterplatten aus Altgeräten zu separieren, wird als wesentlicher Faktor eingeschätzt. Eine Anforderung an die Zahl der Arbeitsschritte wird als weniger sinnvoll erachtet, da die Vorgehensweise bei den Recyclingbetrieben in der Praxis nur bedingt abgebildet werden kann.

#### Anforderung 20: Entnehmbarkeit von Leiterplatten aus EAG

EEG sollten so gestaltet werden, dass enthaltene Leiterplatten von einer einzelnen Person innerhalb von 40 Sekunden mittels Universalwerkzeug zerstörungsfrei vom Gerät separiert werden können. Hersteller müssen den Vorgang mittels Videodokumentation belegen. Maschinen sind zulässig, wenn sie nachweislich eine festzulegende Mindestbandbreite der relevanten Produktgruppen im Markt behandeln können.

Die Abwägungen zur Effektivität und Umsetzbarkeit sind im Wesentlichen identisch mit der produktgruppenübergreifenden Anforderung an die Entnehmbarkeit von Batterien (Kapitel 5.8.1).

### 5.8.4 Recyclingfähigkeit von Gehäusewerkstoffen

Die Kreislaufführbarkeit der in EEG eingesetzten Werkstoffe ist im Wesentlichen vom Bestehen eines etablierten Recyclingpfades abhängig. Teilweise werden jedoch Materialien eingesetzt, für die aktuell kein Recyclingpfad etabliert ist und nach aktuellem Stand von Technik und Forschung auch mittelfristig keine industriellen Prozesse zur Verfügung stehen werden. Die eingesetzten Werkstoffe können demnach nicht stofflich zurückgewonnen werden und gehen dem Stoffkreislauf verloren.

Im Gegensatz dazu sind Gehäuseteile, die zumeist aus Massenkunststoffen oder -metallen bestehen, in vergleichsweise großen Mengen im Recyclingprozess vorhanden. Jedoch werden auch für Gehäuse teilweise Materialien eingesetzt, für die kein etablierter Recyclingpfad existiert. Als Beispiel für solche Werkstoffe können mit Glasfasern und Karbonfasern verstärkte Kunststoffe genannt werden, die in verschiedenen Teilen in den in diesem Vorhaben untersuchten Geräten zum Einsatz kommen, insbesondere in Gehäuseelementen von Flachbildschirmfernsehern. Wie in Kapitel 3.2.5 beschrieben, können bereits Sticker und Etiketten die Recyclingfähigkeit von Kunststoffgehäuseteilen in der Praxis vermindern.

Dementsprechend ist eine Grundforderung für eine verbesserte Kreislaufführbarkeit, dass nur solche Werkstoffe von Herstellern eingesetzt werden, die in der Entsorgung stofflich zurückgewonnen werden können.

### Anforderung 21: Recyclingfähigkeit von Gehäusewerkstoffen

Gehäuseteile sollen aus einem recyclingfähigem Material bzw. Materialien mit wirtschaftlich-technisch machbarer EoL Strategie bestehen. Stoffschlüssig aufgebrachte Komponenten (z.B. Etiketten) sind nur dann zulässig, wenn sie aus dem gleichen Werkstoff wie das Gehäuseteil bestehen, auf das sie aufgebracht sind.

**Erläuterungen:** Der Begriff „machbar“ wird anstelle von „etabliert“ verwendet, um zukünftig zu etablierende Recyclingpfade nicht auszuschließen.

**Relevanz:** Mit Blick auf das Aufkommen von Gehäusekunststoffen im Recycling wird eine Anforderung an deren Recyclingfähigkeit als relevant angesehen. Glasfaser wird bspw. als wesentlicher Störstoff im Kunststoffrecycling genannt, der die Qualität der Rezyklate senkt.

**Effektivität:** Die Anforderung soll prinzipiell die Recyclingfähigkeit der eingesetzten Werkstoffe ermöglichen. Der Effekt einer Umsetzung auf die Ressourcenschonung ist potential sehr hoch einzuschätzen. Erst ein ökobilanzieller Vergleich kann jedoch Aufschluss über die umweltseitigen Vor- oder Nachteile von bspw. einem nicht-recyclingfähigen Kunststoff gegenüber einem recyclingfähigen Metall gewähren.

**Umsetzbarkeit:** Die Anforderung wird zum aktuellen Zeitpunkt nur von einigen Geräten bzw. Gerätegruppen erfüllt (bspw. die Tintenstrahldrucker der untersuchten Stichprobe). Viele Gehäuseteile von EEG sind mit Flammschutzmitteln und anderen Additiven versehen und gehen damit im aktuellen Recyclingpfad verloren (Kapitel 3.2.5). Ein pauschales Verbot von Flammschutzmitteln wird aus Gründen der Sicherheit nicht empfohlen. Ein zukünftiges stoffliches Recycling von flammgehemmten Kunststoffen ist denkbar.

Zur Umsetzung bedarf es einer eindeutigen Definition für „einfach recyclingfähiges Material“ sowie „wirtschaftlich-technisch machbare EoL Strategie“. Alternativ bzw. zusätzlich dazu bedarf es einer Liste mit Stoffen, deren technische und wirtschaftliche Recyclingfähigkeit belegt ist (bspw. flamm-schutzmittelfreies ABS und HIPS, Aluminium) oder in mittelfristiger Zukunft absehbar ist.

Da diese allgemein formulierte Anforderung aufgrund fehlender Definitionen in der Umsetzung problematisch sein könnte, wird im Folgenden spezifisch auf Kunststoffgehäuse eingegangen. Die nachfolgende Anforderung ist inhaltlich identisch mit der an Gehäuse von Tintenstrahldruckern gerichteten Anforderung 13.

### Anforderung 22: Werkstoffauswahl bei Kunststoffgehäusen von EEG

Kunststoffgehäuse [-teile > 25 Gramm] von EEG sollen [mindestens zu X Prozent Massenanteil am Gesamtgehäuse] aus nur einem, recyclingfähigen (Co-)Polymer oder Polymerblend (Thermoplast) bestehen. Stoffschlüssiges Aufbringen von Komponenten aus anderen Werkstoffen, wie Etiketten und Gumminoppen, ist nicht zulässig.

**Erläuterung:** Eine Abschwächung der Anforderung ist möglich, indem nur ein vordefinierter Masseanteil des Kunststoffgehäuses reguliert wird (bspw. 80 Prozent), falls erforderlich. Eine weitere Abschwächung ist die Beschränkung auf Kunststoffgehäuseteile mit einer Masse von über 25 Gramm, wie oftmals von den Umweltzeichen umgesetzt.

**Relevanz:** Die Relevanz ist aus Sicht der Autoren aufgrund der beträchtlichen Menge an Kunststoffen im Elektroschrottreycling als hoch einzuschätzen.

**Effektivität:** Die Anforderung kann aufgrund von Sicherheitsbedenken nicht auf alle EEG angewandt werden. Die Effektivität hängt davon ab, bei welcher Anzahl an Produktgruppen die Anwendbarkeit gegeben ist.

**Umsetzbarkeit:** Sie stellt inhaltlich eine Maximalforderung dar und kann nur auf Produktgruppen angewandt werden, die auch ohne den Zusatz von Flammschutzmitteln kein Sicherheitsrisiko darstellen.

Eine zusätzliche Anforderung betrifft die Verbindung von metallischen Werkstoffen mit Kunststoffen. Im Sinne der Separierbarkeit von Werkstoffen mit unterschiedlichen Recyclingpfaden, sollten diese nicht stoffschlüssig verbunden werden.

#### Anforderung 23: Verbindung von metallischen Werkstoffen und Kunststoffen

Materialverbünde (Metall-Kunststoff und Kunststoff-Kunststoff) dürfen nur mit lösbaren Verbindungstechniken zusammengefügt werden.

**Relevanz:** Die Relevanz erschließt sich aus den Demontageversuchen, in denen insbesondere beim untersuchten OLED-TV und Notebooks stoffschlüssige Verbindungen von Metallen und Kunststoffen identifiziert wurden.

**Effektivität:** Es kann angenommen werden, dass stoffschlüssig verbundene Werkstoffe in heutigen Recyclingverfahren schlechter trennbar sind als lösbar verbundene Werkstoffe. Konkrete Daten konnten im Forschungsvorhaben nicht identifiziert werden.

### 5.8.5 Recyclingfähigkeitsquote

Die Recyclingfähigkeit der eingesetzten Werkstoffe ist die Voraussetzung zur Maximierung der tatsächlichen Recyclingquote. Der Standard IEC 62635 kann als Versuch verstanden werden, der Problemstellung der fehlenden Messbarkeit von Recyclingfähigkeit zu begegnen. Die Probleme mit dem Standard sind im entsprechenden Abschnitt in Anhang Kapitel 9.2.3 diskutiert. Dennoch wird der Gedanke unterstützt, dass die eingesetzten Werkstoffe in Summe zu einem Mindestmaß recyclingfähig sein sollten.

#### Anforderung 24: Recyclingfähigkeit der eingesetzten Werkstoffe

Die Recyclingfähigkeitsquote der eingesetzten Werkstoffe soll mit Bezug zur Masse des Gesamtgerätes mindestens X Prozent nach IEC 62635 betragen.

**Erläuterung:** Für den Parameter „X“ kann für die jeweilige betrachtete Produktgruppe eine konkrete Zahl festgelegt werden. Eine Recyclingfähigkeitsquote von bspw. 80 Prozent bei Tintenstrahldruckern würde bedeuten, dass 80 Prozent der eingesetzten Werkstoffe prinzipiell recyclingfähig ist (nach IEC 62635) und nur die verbleibenden 20 Prozent aus nicht-recyclingfähigem Material bestehen (bspw. flammgehemmte oder glasfaserverstärkte Kunststoffe, nicht kreislauffähbare Sondermetalle).

**Relevanz:** Die Relevanz wird aufgrund des Einsatzes von nicht recyclingfähigen Werkstoffen in EEG gesehen.

**Effektivität:** Eine Recyclingfähigkeitsquote auf ein Gesamtgerät festzulegen, anstatt einzelne Aspekte zu regulieren (z.B. Gehäuse), wird als ein effektiver Ansatz gesehen. Es ist damit dem Hersteller überlassen, welche Produktkomponenten aus recyclingfähigem Material bestehen, um die vordefinierte Quote zu erreichen. Designaspekte (Verbindungstechniken usw.), welche die tatsächliche Recyclingrate maßgeblich mitbestimmen, werden in diesem Ansatz jedoch nicht einbezogen. Da es sich um eine rein massenbasierte Recyclingquote handelt, sind die geringen Mengen und Konzentrationen vieler Edel- und Sondermetalle in EEG u.U. nicht betroffen.

**Umsetzbarkeit:** Die Anforderung ist quantitativ und dadurch messbar und überprüfbar. Die Datengrundlage zur Bestimmung der Recyclingfähigkeitsquote aller in EEG eingesetzter Werkstoffe ist nach aktuellem Stand nicht ausreichend. Hier wird Bedarf für Forschung und Normung gesehen.

### 5.8.6 Kennzeichnung von Kunststoffen

Eine Einprägung in Kunststoffteilen erlaubt eine eindeutige Identifizierung des verwendeten Basispolymers, des eingesetzten Flammschutzmitteltyps und eventuellen weiteren Additiven. Prinzipiell ermöglicht die Kennzeichnung somit eine sortenreine manuelle Sortierung. Im Fall einer Sortierung nach mechanischer Zerkleinerung, bspw. einer Dichtentrennung, hat die Kennzeichnung keinen Nutzen, stört die Prozesse jedoch auch nicht.

Dem Vorhaben liegen Informationen vor, dass einzelne Recyclingunternehmen anhand der Kunststoffkennzeichnung Einblick in die durchschnittliche Zusammensetzung spezifischer Produktgruppen erhalten, die zum Zeitpunkt der Analyse in die Recyclingprozesse gelangen. Somit erhält das Recyclingunternehmen Informationen zum Materialgehalt der eingehenden Altgeräte, ohne zeit- und kostenintensive Materialanalysen durchführen zu müssen. Bei Recyclingprozessen im Ausland, bei denen im Vergleich zu Deutschland manuelle Arbeitsschritte häufiger Anwendung finden, kann die Kennzeichnung die sortenreine Trennung begünstigen. Dazu bedarf es einer einheitlichen Kennzeichnung.

#### Anforderung 25: Kennzeichnung von Kunststoffen

Kunststoffteile [>25 Gramm] sollen nach DIN EN ISO 11469 unter Beachtung von DIN EN ISO 1043 gekennzeichnet werden. Die Kennzeichnung muss ersichtlich sein und darf nicht von anderen Elementen verdeckt sein.

**Relevanz:** Der Kunststoffanteil an EEG liegt Schätzungen zufolge bei 20 – 25 Masseprozent. Anhand der Demontageversuche wurde festgestellt, dass nicht alle Kunststoffteile markiert bzw. einheitlich markiert werden.

**Effektivität:** Die Designanforderung stellt die eindeutige Identifizierbarkeit der eingesetzten Kunststoffe sicher. Der Effekt der Kunststoffkennzeichnung auf die Kreislaufführbarkeit von Kunststoffen in Deutschland und den EU-Mitgliedstaaten wird als unerheblich eingeschätzt, da Kunststoffteile in der Regel nicht manuell nach visueller Inspektion, sondern nach einer mechanischen Zerkleinerung automatisiert sortiert werden. Die Maßnahme kann jedoch als relevante Informationsgrundlage, beispielsweise für Analysen bei Recyclingbetrieben und anderen Interessenten (Wissenschaft, Behörden), dienen.

**Umsetzbarkeit:** Die Anforderung ist überprüfbar. Laut einzelnen Herstellern im Begleitkreis des Vorhabens ist der Kostenaufwand für die Einprägung vernachlässigbar. Es wurde festgestellt, dass die Kennzeichnung nicht immer zuverlässig den eingesetzten Kunststofftyp anzeigt.

### 5.8.7 Einsatz von Sekundärrohstoffen

Zur Schließung von Stoffkreisläufen bedarf es verschiedener Voraussetzungen. Neben der Recyclingfähigkeit der in Produkten eingesetzten Werkstoffe und einer Konstruktion, die eine Separierung dieser recyclingfähigen Werkstoffe ermöglicht, werden auch ökonomische Anreize für relevante Marktteilnehmer benötigt, den Recyclingprozess qualitativ hochwertig durchzuführen. Dazu wird eine stabile Nachfrage nach Sekundärrohstoffen benötigt. Im Fall von Kunststoffen besteht ein Defizit in der Nachfrage nach Kunststoffzyklen. Zur Schließung des Kreislaufes wird daher empfohlen, den Markt durch produktbezogene Regulierung zu stimulieren.

### Anforderung 26: Einsatz von Kunststoffrecyklaten

EEG sollen einen Masseanteil von mindestens X Prozent PCR Kunststoff [aus EAG] enthalten, bezogen auf die gesamte Masse an eingesetztem Kunststoff. Der Masseanteil wird nach 3 Jahren auf Y Prozent und nach 5 Jahren auf Z Prozent angehoben.

**Erläuterungen:** PCR steht hier für „post-consumer recycled“ in Abgrenzung zu bspw. „post-industrial recycled“ (PIR). Es wird die Bedeutung der Quelle hervorgehoben, denn ein Stoffkreislauf führt idealerweise Werkstoffe in die gleiche Anwendung zurück, aus der sie stammen, ohne dass Werkstoffe in Anwendungen mit geringeren Qualitätsanforderungen eingesetzt werden („Downcycling“). Dies kann jedoch ein mittelfristiges Ziel sein, weshalb „aus EAG“ zunächst in Klammern gesetzt wurde. Der Masseanteil kann zunächst ein geringer Wert sein, um Herstellern den Aufbau einer zuverlässigen Lieferkette zu ermöglichen bzw. auch um ein Herantasten an die technische Umsetzung und die unweigerlich damit einhergehenden Hürden zu ermöglichen (Bspw. Feststellung des benötigten Qualitätsniveaus der PCR Kunststoffe, Identifizierung von zuverlässigen Quellen, die in den benötigten Volumina bereitstellen kann).

**Effektivität:** Die Effektivität hängt von der Anzahl der Produktgruppen ab, auf welche die Anforderung angewandt wird, und die entsprechende Nachfrage nach Kunststoffrecyklaten am Markt. Weiterhin hat der festgelegte Massenanteil einen Einfluss auf die Effektivität der Anforderung.

**Umsetzbarkeit:** Eine Überprüfung durch die Marktaufsichtsbehörden am einzelnen Gerät ist durch messtechnische Methoden kaum möglich. Alternativ kann eine Zertifizierung der Lieferkette zur Verifizierung gefordert werden. Es ist denkbar, diese Anforderung zunächst im Rahmen des Blauen Engels umzusetzen. Es wird empfohlen, einer eventuellen Schadstoffproblematik vorzubeugen, denn nach aktuellem Stand sind PCR Kunststoffrecyklate mit einem Reinheitsgrad von nur annähernd 100 Prozent verfügbar (vgl. Kapitel 3.2.5). Der Einsatz von PCR Kunststoffen sollte aufgrund zu strenger Materialanforderung verhindert werden, insbesondere vor dem Hintergrund eventueller Verunreinigungen durch Altlasten (z.B. Spuren von durch stoffbezogene Gesetzgebung in ihrem Einsatz beschränkte Bromverbindungen und Phthalaten).

Schreibtischdrucker könnten als Testvehikel zur Umsetzung der Anforderung dienen. Dabei werden folgende konkrete Massenanteile vorgeschlagen:

- ▶ X = 10 Prozent
- ▶ Y = 20 Prozent
- ▶ Z = 30 Prozent

## 5.9 Weitere Anforderungen an Gerätebatterien

Die nachfolgenden Designanforderungen werden im Wesentlichen aus den Erkenntnissen aus Kapitel 4 abgeleitet. Zunächst werden für die untersuchten Produktgruppen spezifische Anforderungen formuliert, anschließend geht es um die Entnehmbarkeit und Austauschbarkeit, als auch um die Lebensdauer, von Akkumulatoren in EEG generell.

### 5.9.1 Lebensdauer von Gerätebatterien

Die begrenzte Lebensdauer von Lithium-Ionen Akkumulatoren ist in Kapitel 4.2.2 zusammenfassend dargestellt. Hersteller elektronischer Geräte geben i.d.R. eine zweijährige, freiwillige Garantieleistung auf ihre Geräte. Wie in Kapitel 3.4.6 diskutiert, ist der Akku als sog. Verschleißteil von dieser Regelung ausgenommen bzw. wird die Herstellergarantie auf den Akku nur eingeschränkt (verkürzte Zeitspanne) angewandt. Da die Herstellergarantie eine freiwillige Leistung der Hersteller darstellt, kann der Gesetzgeber hier nicht regulierend eingreifen. Dennoch empfehlen die Autoren der Studie den Herstellern, die volle Garantiedauer auch auf Akkumulatoren auszuweiten. Insbesondere sollte keine

Unterscheidung zwischen dem Gerät und dem Akkumulator gemacht werden, wenn dieser in das Gerät integriert und somit nicht leicht vom Nutzer selbst austauschbar ist.

Zur Sicherstellung, dass Akkumulatoren in EEG eine Mindestlebensdauer aufweisen, kann eine Anforderung an die Zyklenstabilität gestellt werden.

#### Anforderung 27: Technische Lebensdauer von Akkumulatoren in EEG

Akkumulatoren sollen nach X durchlaufenen Ladezyklen noch mindestens 80 Prozent ihrer Kapazität, gemessen an der Bemessungskapazität nach EN 61960, speichern und abgeben können. [Der Hersteller muss die Testergebnisse in allgemeinverständlicher Form auf der Produktwebseite veröffentlichen.]

**Erläuterung:** Der Parameter „X“ muss individuell je Produktgruppe definiert werden, bspw.

- ▶ Smartphones: 500 (1000) Vollladezyklen
- ▶ Notebooks: 500 (1000) Vollladezyklen
- ▶ E-Book-Reader: 200 (500) Vollladezyklen

**Effektivität:** Die Anforderung kann vermeiden, dass Geräte mit einem qualitativ minderwertigen Akkumulator in den Markt eintreten und Frühausfälle der Geräte und damit potentiell ein erhöhtes Abfallaufkommen verursachen.

**Umsetzbarkeit:** Hersteller vor dem Markteintritt zu Lebensdauertests mit Akkumulatoren zu verpflichten, ist u.U. problematisch, da die Tests eine beträchtliche Zeitspanne in Anspruch nehmen können. Wird zum Beispiel ein Lade- und Entladevorgang von jeweils drei Stunden angenommen, benötigt ein Vollladezyklus 6 Stunden im Labortest. Bei 1000 zu testenden Zyklen ergibt sich eine Zeitspanne von über acht Monaten. Der Hersteller kann dennoch dazu verpflichtet werden, Testergebnisse im Sinne einer Informationsanforderung zu veröffentlichen.

Alternativ kann die Anforderung auf Ersatzakkus angewendet werden. So könnten ggf. auch die Bedenken der Hersteller bzgl. Sicherheitsaspekten mit Ersatzakkumulatoren von Drittanbietern begegnet werden (wesentliche Begründung für das Integrieren von Akkumulatoren, siehe u.a. Kapitel 3.4.6).

#### Verlängerung der Lebensdauer von Akkumulatoren in EEG

Hohe Ladezustände führen bei Li-Ionen-Akkumulatoren sowohl kalendarisch wie zyklisch zu einer deutlich verkürzten Lebensdauer (Kapitel 4.2.2). Betroffen sind davon insbesondere Geräte, die überwiegend stationär betrieben werden (z.B. teilweise Business-Notebooks) oder die mehrheitlich auf einer Ladestation stehen (z.B. teilweise elektrische Zahnbürsten). Der Einfluss der Hersteller auf das Nutzerverhalten ist begrenzt. Es ist aber dennoch möglich, Maßnahmen zur Verlängerung der Lebensdauer von Lithium-Ionen-Akkumulatoren in EEG zu treffen.

Teilweise bieten beispielsweise Notebookhersteller die Möglichkeit, den Ladezustand von Akkumulatoren zu begrenzen, wenn dauerhaft stationär im Netzbetrieb gearbeitet wird. So wird ein permanent hoher Ladezustand vermieden und die Batterielebensdauer potentiell verlängert. Der Nutzende kann diese Einstellung manuell abschalten, wenn der Akku voll aufgeladen werden soll (z.B. vor einer geplanten mobilen Nutzung).

Smartphones mit einer Schnellladefunktion bieten dem Nutzer teilweise die Möglichkeit, die Schnellladung vorübergehend abzuschalten, um eine frühzeitige Alterung des Akkus durch Schnellladung zu vermeiden (z.B. sinnvoll, wenn über Nacht geladen werden soll).

Maßnahmen müssen dabei je nach Produktgruppe unterschiedlich beschaffen sein, eine pauschale Anforderung wird daher nicht als zielführend betrachtet.

**Anforderung 28: Strategie zur Optimierung der Batterielebensdauer**

Hersteller von akkubetriebenen Produkten müssen nachweislich eine Strategie zur Verlängerung der Batterielebensdauer vorlegen. [Diese muss öffentlich einsehbar hinterlegt werden (z.B. Produktwebseite)].

Die Anforderung ist zunächst nur eine Informationsanforderung. Sie kann Nutzer für den Einfluss der Nutzungsmuster auf die Lebensdauer von Geräteakkumulatoren sensibilisieren. Alternativ kann für einzelne Produktgruppen eine konkrete Maßnahme festgeschrieben werden.

**5.9.2 Informationsanforderungen**

Laut Teilnehmern des Begleitkreises basiert eine erhebliche Anzahl an gestellten Garantieansprüchen bzgl. der Geräteakkumulatoren auf einer Fehleinschätzung. Oftmals stellen Nutzer eine verkürzte Nutzungsdauer ihrer Geräte je Ladevorgang fest und schließen daraus, dass der Geräteakku deutlich an speicherbarer Kapazität verloren hat. In vielen Fällen liegt die verkürzte Nutzungsdauer je Ladevorgang jedoch in Softwarefehlern begründet (bei Smartphones: sog. „rogue apps“). Eine einfache Prüfung des Gesundheitszustandes des Akkumulators ist dem Nutzer i.d.R. jedoch nicht möglich.

Nach Erkenntnisstand der Autoren sind Akkumulatoren in der zweijährigen, gesetzlichen Gewährleistung inbegriffen. Hier muss jedoch unterschieden werden zwischen regulärem Verschleiß und einem Mangel, der Bereits zum Kaufzeitpunkt vorlag. Nach der Beweislastumkehr von sechs Monaten nach dem Kaufdatum muss der Nutzende nachweisen, dass bereits zum Kaufzeitpunkt ein Mangel vorlag. Im Fall von Akkumulatoren hat der Nutzende i.d.R. keinen Einblick in den konkreten Gesundheitszustand.

Auch im Sinne der Vorbereitung zur Wiederverwendung ist es sinnvoll, wenn eine einfache Prüfung des Gesundheitszustandes des Akkumulators möglich ist. So kann das Vertrauen von Nutzern in den Zweitnutzungsmarkt potentiell gestärkt werden.

**Anforderung 29: Informationen über den Gesundheitszustand von Akkumulatoren in EEG**

Der Nutzer soll mindestens auf folgende Informationen Zugriff haben: Nennkapazität, aktuelle Kapazität bei voller Ladung, Gesundheitszustand [Prozent], Anzahl durchlaufener Ladezyklen

Die Begriffe werden in Tabelle 23 näher definiert.

Tabelle 23: Definition zur Informationsanforderungen an Akkumulatoren aus EEG

Datenpunkt	Definition
Nennkapazität CN [mAh]	Bemessungskapazität nach DIN EN 61960 Ladung und Entladung mit 0,2 C Randomisierte Stichproben zulässig
Gesundheitszustand SoH [Prozent]	$SoH = (C_A / C_N) * 100$ $C_A$ – Aktuelle Kapazität bei voller Ladung [mAh] $C_N$ - Bemessungskapazität Die Bestimmung der aktuellen Kapazität kann durch Bemessungszyklen während der Nutzung oder modellbasiert erfolgen
Anzahl durchlaufener Vollladezyklen	Ein Vollladezyklus entspricht dem Umsatz der Nennkapazität und wird entsprechend anteilig aufaddiert
Ladezustand SoC [Prozent]	$SoC = (C_L / C_N) * 100$ $C_L$ – Aktuelle noch nutzbare Kapazität des Akkus $C_N$ - Bemessungskapazität

**Relevanz:** Über den Gesundheitszustand wird es dem Nutzer möglich zu erfahren, wie viel seiner ursprünglich vorgesehenen Kapazität (Nennkapazität) der Akku aktuell noch speichern und abgeben kann. Diese Angabe nützt auch dem Zweitnutzungsmarkt, beispielsweise beim Wiederverkauf von gebrauchten Notebooks nach einem Aufbereitungsprozess (Refurbishment).

**Effektivität:** Die Anforderung dient der Information des Nutzenden über den Gesundheitszustand der Gerätebatterie. Prinzipiell wird dies auch als sinnvoll erachtet, um den Gebrauchtwarenmarkt zu stärken. Es konnte jedoch im Forschungsvorhaben nicht untersucht werden, wie sich die Kenntnis über die unweigerlich abnehmende Batteriekapazität auf das Nutzerverhalten auswirkt.

**Umsetzbarkeit:** Vorhandene Normen sind z.T. nicht spezifisch genug (z.B. Bemessungskapazität: Spannungsgrenzen können vom Hersteller frei gewählt und somit die Nennkapazität direkt beeinflusst werden).

### **Kennzeichnung des Batterietyps und enthaltener Wertstoffe**

Batterien und Akkumulatoren, die separat gesammelt oder im Zuge der Schadstoffentfrachtung aus Altgeräten separiert werden, müssen für ein stoffliches Recycling nach chemischem System sortiert werden. Die Sortierung erfolgt häufig teilweise anhand von Labels und Kennzeichnungen auf den Batterien, die in der Praxis jedoch häufig fehlen. Batterien, die nicht identifizierbar sind, werden dem Recyclingprozess nicht zugeführt, sondern entsorgt (Tecchio et al. 2017). Die UBA-Empfehlungen zu Behandlungsanforderungen an EAG enthalten die Maßgabe, dass Altbatterien nach der Entfernung aus einem Gerät nach chemischen Systemen und Typengruppen untergliedert werden können (Umweltbundesamt 2017b).

In Gesprächen mit Betreibern von Batterierecyclinganlagen konnte der Nutzen einer Kennzeichnung des Batterietyps und chemischen Subsystems (vgl. Kapitel 4.2.3) im Bereich von EEG nicht abschließend geklärt werden. Prinzipiell würden zusätzliche Informationen zur Zusammensetzung der Batterien begrüßt, jedoch bestand keine Einigkeit über die Art der Information und der Kennzeichnung. Eine konkrete Anforderung wird daher nicht formuliert. Es wird jedoch empfohlen, den Nutzen sowie die optimale Form einer Kennzeichnung tiefergehend zu untersuchen.

### **5.9.3 Verfügbarkeit von Ersatzakkumulatoren**

Ersatzakkumulatoren werden im Laufe der Nutzungsphase benötigt, wenn der ursprüngliche Akkumulator deutlich an Kapazität verloren hat. Je nach Produktgruppe ist dies erst nach den ersten Jahren der Nutzungsphase der Fall. Die fehlende Verfügbarkeit von qualitativ verlässlichen und dem Restwert des Gerätes angemessenen Ersatzteilen kann zur vorzeitigen Entledigung des Gerätes durch den Nutzer führen. Für Geräte mit integrierten Akkumulatoren (z.B. Smartphones, Notebooks) stellen Hersteller oftmals keine Ersatzakkumulatoren am Markt bereit. Aufgrund der Konstruktion integrierter Akkus (weiche Pouchzellen) sind dabei Sicherheitsrisiken in Betracht zu ziehen.

#### **Anforderung 30: Verfügbarkeit von Ersatzakkumulatoren**

Der Hersteller soll dafür Sorge tragen, dass Ersatzakkumulatoren von vergleichbarer Qualität bis zu 5 Jahre nach Einstellung der Produktion für ein bestimmtes Gerät verfügbar sind. Das Herstellen und Inverkehrbringen durch Drittanbieter ist zulässig, jedoch soll der Gerätehersteller für einen Mindestqualitätsstandard einstehen (bzw. Erfüllung von Anforderung 27).

**Relevanz:** Die Anforderung verlängert potentiell die Nutzungsphase von akkubetriebenen Geräten.

**Umsetzbarkeit:** Es ist unklar, inwieweit der Gerätehersteller für Qualitätsstandard von Drittanbietern verantwortlich gemacht werden können. Ggf. reicht eine Anforderung an die Qualität (Lebensdauer) der Ersatzakkumulatoren im Sinne der Anforderung 30 aus.

## 5.10 Diskussion weiterer Anforderungen

Die folgenden Problemstellungen wurden in Betracht genommen, führten jedoch nicht zu konkreten Designanforderungen bzw. benötigen weitergehende Analysen:

- ▶ Die im Begleitkreis teilnehmenden Erstbehandlungsanlagen äußerten einstimmig, dass produktspezifische Demontageanleitungen in der Praxis keine Anwendung finden können. Solche Informationen des Herstellers sind allenfalls zu Schulungszwecken interessant. Anleitungen können auf Ebene ganzer Produktgruppen hilfreich sein, wenn eine neue Produktgruppe am Markt platziert wird, oder wenn eine bekannte Produktgruppe mit einer neuen Technologie ausgestattet wird, die Erstbehandlungsanlagen potentiell vor neue Herausforderungen stellen (Beispiel: Kühlschränke mit Vakuum-Isolationspaneelen oder OLED TV).
- ▶ Austauschbarkeit bzw. Aufrüstbarkeit von Komponenten (z.B. Massenspeicher, Arbeitsspeicher bei Notebooks) könnten an den Konsumenten kommuniziert werden, beispielsweise mittels Label auf der Verpackung, ähnlich der Austauschbarkeit von Akkumulatoren.
- ▶ Universalnetzteile werden als sinnvoll erachtet und sollten mindestens weiter bei Smartphones eingesetzt werden, jedoch, soweit technisch möglich, auch bei anderen Produktgruppen, beispielsweise Notebooks. Dabei sollte das Kabel selbst vom Netzteiladapter trennbar sein. Somit ist das Kabel potentiell auch zum Übertragen von Daten verwendbar. Ein naheliegender Standard wäre USB-C. Ladekabel sollten dann als optionales Zubehör verkauft werden.

## 6 Handlungsempfehlungen

Auf Grundlage der in Kapitel 5 formulierten Anforderungen und der jeweiligen erwarteten Effektivität und Umsetzbarkeit, sowie der Mengenrelevanz der jeweiligen Zielstoffe in betroffenen Geräten und Komponenten, werden im Folgenden Handlungsempfehlungen an das Umweltbundesamt ausgesprochen.

### Handlungsempfehlungen zu Notebooks

Bei Notebooks steht die Entnehmbarkeit der Akkumulatoren im Vordergrund. Das Verbringen der Leiterplatten in fachgerechte Recyclingpfade liegt im ökonomischen Interesse der Akteure der Recyclingkette. Die Recyclingfähigkeit der Kunststoffgehäuse ist nach aktuellem Stand nicht gegeben und sollte gefördert werden. Das Recycling von Indium aus Displays wird bei Flachbildschirmfernsehern zurzeit als aussichtsreicher betrachtet. Der Marktanteil von Notebooks mit Festplattenlaufwerken nimmt ab und muss zur Kreislaufführbarkeit von Neodym nicht zwangsläufig reguliert werden.

- ▶ Es wird empfohlen, die Separierbarkeit von Akkumulatoren aus Notebooks in der Erstbehandlung zu fördern und damit auch die Austauschbarkeit in der Nutzungsphase zu begünstigen. Dazu werden die Maßgaben der **Anforderung 1** in der Umsetzung unter der Ökodesign-RL als effektives Vorgehen eingeschätzt.
- ▶ Wenn die Praxis der Integration von Akkumulatoren in Notebooks nicht reguliert werden kann oder soll, wird empfohlen, die Maßgaben der **Anforderung 2** unter der Ökodesign-RL zu verankern, um die Entnehmbarkeit der Akkumulatoren in der Erstbehandlung als auch die Austauschbarkeit in der Nutzungsphase zu begünstigen.
- ▶ Weiterhin sollten die Angaben der Hersteller zur technischen Lebensdauer von Notebook-Akkumulatoren im Sinne der **Anforderung 27** spezifiziert werden.
- ▶ Um den Einsatz recyclingfähiger Werkstoffe zu fördern, wird empfohlen, die Maßgaben der **Anforderung 22** unter der Ökodesign-RL zu verankern.
- ▶ Die Wiederverwendung von Produktkomponenten ist im Sinne der Kreislaufwirtschaft dem stofflichen Recycling übergeordnet. Im Sinne der **Anforderung 5** wird daher empfohlen, dass die wesentlichen, für eine Wiederverwendung in Frage kommenden, Komponenten nur reversibel mit lösbaren Verbindungstechniken im Gerät verbaut werden. Dies dient auch der Reparatur- und Aufrüstfähigkeit der Notebooks.

### Wesentliche Handlungsempfehlungen zu Smartphones

Aus ökobilanzieller Sicht sollte die Verlängerung der Nutzungsdauer von Smartphones im Vordergrund stehen (Proske et al. 2016). Eine Austauschbarkeit von Komponenten wird damit als eminent angesehen. Mit Bezug zum Recycling steht die Entnehmbarkeit von Akkumulatoren im Vordergrund. Es wird angenommen, dass die Leiterplatten als ökonomischer Treiber der Recyclingaktivitäten i.d.R. in den fachgerechten Recyclingpfad gelangen und eine Separierbarkeit nicht zwangsläufig durch Ökodesign-Anforderungen reguliert werden muss.

- ▶ Die Maßgaben der **Anforderung 8** stellen die Maximalforderung bzgl. der Entnehmbarkeit und Austauschbarkeit von Akkumulatoren aus Smartphones dar. Wenn die Integration von Akkumulatoren nicht reguliert werden kann oder soll, wird **Anforderung 9** als Schritt zur Vereinfachung der Entnehmbarkeit als abgeschwächte Anforderung als sinnvoll erachtet.
- ▶ Zusätzlich wird empfohlen, die Verfügbarkeit von qualitativ-hochwertigen Ersatzakkumulatoren für Smartphones sicher zu stellen. Dazu sind die Maßgaben der **Anforderung 27** und bzw. oder **Anforderung 30** geeignet.
- ▶ Die **Anforderung 10** schreibt den Einsatz von ausschließlich lösbaren Verbindungstechniken bei Smartphones zum Zweck der Entnahme recyclingrelevanter Komponenten vor und ist insbesondere für eine Umsetzung unter dem Blauen Engel geeignet.

- ▶ Es wird empfohlen, bei Smartphones vorrangig die Verlängerung der Nutzungsdauer anzustreben. Hierzu sind u.a. die **Anforderungen in Kapitel 5.3.3** geeignet: Modularisierung bzw. Austauschbarkeit von Displaymodulen und mechanisch beanspruchten Komponenten (Knöpfe, Buchsen) sowie möglichst langer Softwaresupport durch die Hersteller oder Drittanbieter. Diese Anforderungen sind in diesem Forschungsvorhaben aufgrund der fehlenden Recyclingrelevanz noch nicht hinreichend untersucht worden. Es bedarf weiterer Analysen.

### **Wesentliche Handlungsempfehlungen zu Flachbildschirmfernsehern**

Bei Flachbildschirmfernsehern wird vorgeschlagen, einerseits die Demontagefähigkeit der Geräte zu erhöhen und andererseits Anforderungen an die Behandlung der Geräte im Recyclingprozess zu stellen.

- ▶ Zur Vereinfachung einer manuellen Demontage wird empfohlen, dass die Gehäuserückwand nur mit Schrauben eines Typs verschlossen werden, die gut sichtbar und erreichbar sind. Diese Maßgabe der **Anforderung 18** wird für eine Implementation für die gesamte Produktgruppe unter der Ökodesign-RL vorgeschlagen. Eine einfache Demontierbarkeit der Rückwand ermöglicht schnellen Zugriff auf die enthaltenen Leiterplatten und potentiell die Displayeinheit (der Verwendung teilautomatisierter Prozesse zur Gehäuseöffnung steht diese Anforderung nicht entgegen).
- ▶ Um den Einsatz recyclingfähiger Werkstoffe zu fördern, wird empfohlen, die Maßgaben der **Anforderung 22** unter der Ökodesign-RL zu verankern.
- ▶ Weiterhin wird empfohlen, die **Anforderung in Kapitel 5.4.3** an die Demontage von FSB-TVs zu stellen, damit der Technologiewechsel von CCFL- zu LED-Hintergrundbeleuchtungen nicht dazu führt, dass TVs in der Erstbehandlung nicht unmittelbar in die mechanische Zerkleinerung gegeben werden. Weiterhin kann die in Kapitel 5.4.2 angeschnittene Lagerung von Displaypanels erneut thematisiert werden. Diese Anforderung wurde jedoch im Forschungsvorhaben noch nicht vertieft analysiert.
- ▶ Zur potentiellen Verlängerung der Lebensdauer durch Vereinfachung der Reparierbarkeit wird empfohlen, dass Netzteilkomponenten nicht im Mainboard integriert werden (Kapitel 5.4.3). Diese Anforderung wurde jedoch im Forschungsvorhaben noch nicht vertieft analysiert.
- ▶ Der produktbezogene Umweltschutz sollte die im Markt aufkommende Modularisierung, insbesondere von OLED-TVs, fördern, und möglichst eine Standardisierung bzw. Kompatibilität von Komponenten zwischen verschiedenen Herstellern fördern (insbesondere Interkompatibilität der Displaymodule, Elektronikmodule, Audiotechnik). Diese Anforderung wurde jedoch im Forschungsvorhaben noch nicht vertieft analysiert.

### **Wesentliche Handlungsempfehlungen zu Schreibtischdruckern**

Bei Schreibtischdruckern stehen aus Sicht der Autoren die Recyclingfähigkeit der eingesetzten Kunststoffe sowie der Einsatz von Rezyklaten im Vordergrund.

- ▶ Für Tintenstrahldrucker, die prinzipiell ohne flammgehemmte Kunststoffe auskommen können, wird empfohlen, die Maßgaben der **Anforderung 13** unter der Ökodesign-RL zu verankern. Diese gilt ebenfalls für Laserdrucker, lässt aber aus Gründen der Sicherheit den Zusatz von Flammschutzmitteln zu.
- ▶ Um eine Kreislaufführbarkeit von Kunststoffen aus EEG zu ermöglichen, wird empfohlen, eine Mindestquote für den Einsatz von Kunststoffrezyklaten (PCR Kunststoffe aus EAG) in Druckern entsprechend der **Anforderung 26** unter der Ökodesign-RL zu verankern.

- ▶ Aufgrund des zu erwartenden mechanischen Aufschlusses von Druckern (manuelle Demontageschritte kommen nur zur Entnahme von Tonerkartuschen zum Einsatz) wird eine Umsetzung der **Anforderung 23** nahegelegt, um die Trennbarkeit von Kunststoffen von metallischen Werkstoffen zu fördern.

### Produktübergreifende bzw. produktgruppenunspecifische Handlungsempfehlungen

Die folgenden Anforderungen sind produktgruppenübergreifend oder für verschiedene Produktgruppen zutreffende Formulierungen.

- ▶ Es wird empfohlen, eine grundsätzliche Anforderung an die Entnehmbarkeit und Austauschbarkeit von Gerätebatterien und –akkumulatoren im Sinne der **Anforderung 16** zu prüfen. Hier wird insbesondere Bedarf zur rechtlichen Klärung der Begrifflichkeiten bzgl. der genannten Ausnahmeregelungen gesehen. Die Entnehmbarkeit bzw. Austauschbarkeit sollte im Fall einer Regulierung auch auf **E-Book-Reader** und **elektrische Zahnbürsten** angewendet werden.
- ▶ Der Einsatz von Rezyklatkunststoffen laut **Anforderung 26** als Maßgabe der Ökodesign-RL soll auch für weitere Produktgruppen gefordert werden.
- ▶ Ebenso sollten die Hersteller anderer Produktgruppen die Maßgaben der **Anforderung 22** beachten, um eine Recyclingfähigkeit der eingesetzten Kunststoffe zu fördern.
- ▶ Die Kunststoffkennzeichnung entsprechend der **Anforderung 25** ist eine wichtige Informationsquelle u.a. für Recyclingunternehmen, Behörden und Wissenschaft. Es muss jedoch sichergestellt werden, dass diese normgerecht und korrekt implementiert wird.
- ▶ Die zweijährige, gesetzliche Gewährleistung sollte Geräteakkumulatoren explizit miteinschließen. Es sollten produktgruppenspezifische Kriterien festgelegt werden, welcher Bereich des unvermeidbaren Kapazitätsverlustes als Verschleiß definiert ist und in welchem Bereich ein Mangel bereits beim Kauf vorlag (z.B.: integrierte Smartphone-Akkumulatoren müssen nach 500 Vollladezyklen mindestens 80 Prozent ihrer Nennkapazität speichern und abgeben können). Zum Nachweis wird ggf. eine Informationsanforderung im Sinne der **Anforderung 29** benötigt.
- ▶ Das Forschungsvorhaben konnte sich nicht tiefergehend mit den technischen Details der sicheren Datenlöschung in **Anforderung 7** befassen. Zu diesem Zeitpunkt wird daher eine Selbstverpflichtung der Hersteller unter der Ökodesign-Richtlinie als sinnvoll erachtet, da die technische Kompetenz bei den Herstellern liegt, als auch bei Unternehmen, die sich auf die Bereitstellung entsprechender Software zur Datenlöschung spezialisieren.

Weiterhin wird Bedarf für Normenarbeit gesehen, beispielsweise für folgende Problemstellungen:

- ▶ Eine Angabe der Hersteller zur technischen Lebensdauer von Geräteakkumulatoren ist erst dann zwischen Geräten und Herstellern vergleichbar, wenn einheitliche Definitionen für verschiedene Testparameter in der Bestimmung der Zyklenbeständigkeit nach EN 61960 festgelegt werden (u.a. Laderegime, Spannungsgrenzen). Diese müssen produktgruppenspezifisch möglichst realitätsnah gestaltet werden. Hier muss zumindest eine Nachvollziehbarkeit der angewandten Testparameter gewährleistet werden. Es wird vorgeschlagen, ein entsprechendes Normungsmandat anzustreben.
- ▶ Eine Recyclingfähigkeitsquote im Sinne der Anforderung 26 wird als sinnvoll erachtet, jedoch ist eine Überarbeitung des Standards IEC 62635 notwendig. Entsprechende Arbeiten laufen bereits bzw. sind z.T. bereits abgeschlossen (u.a. Normungsmandat M/543 und technische Literatur (Chancerel und Marwede 2016)).
- ▶ Es wird empfohlen, eine Klassifizierung von lösbaren bzw. unlösbaren Klebverbindungen im Rahmen der Normung zu erarbeiten.

## 7 Ausblick und weiterer Forschungsbedarf

Ziel des Projektes war es, für ausgewählte Produktgruppen konkrete Maßnahmen mit ökologischem Vorteil abzuleiten. Es ist dem Auftragnehmer bewusst, dass die vorgeschlagenen Maßnahmen kurzfristig gesehen nicht in jedem Fall mit Geschäftsmodellen von Industrieunternehmen in Einklang stehen. Vom Auftraggeber ist ein Forschungsauftrag vergeben worden, der zur Erzielung von Langfristökonomie Denkanstöße und Handlungsempfehlungen beinhalten soll.

Aus den Untersuchungen kann für alle ausgewählten Produktgruppen abgeleitet werden, dass sie insbesondere folgende Aspekte aufweisen sollten:

- ▶ Die Auswahl der Materialien sollte so erfolgen, dass die Auswirkungen auf die Umwelt so gering wie möglich sind. Materialien, die eine hohe Kreislaufführbarkeit aufweisen, sollten vorrangig verwendet werden. Die Anwendung von Ökobilanzen kann helfen, Produkte ökologisch vorteilhaft zu gestalten.
- ▶ Die Ressourcenproduktivität kann erhöht werden, indem Produkte lange Nutzungs- und Lebensdauern aufweisen, da der Energieverbrauch in der Nutzung bei den untersuchten Produktgruppen nachrangig eingeschätzt wird.
- ▶ Um die Ressourcenproduktivität zu erhöhen, ist es vorteilhaft, Produkte reparieren zu können, was durch einen modularen Aufbau erreichbar ist.
- ▶ Miniaturisierte elektronische Systeme, die in ihrem Ergebnis kurze Wege aufweisen auf welchen wenig Verlustleistung in Form von Abwärme entsteht, und die den Einsatz von Ressourcen in der Fertigung verringern, sind per se anzustreben. Teilweise stehen diese jedoch der oben angesprochenen Reparierbarkeit im Wege.

### 7.1 Verbesserung der Datengrundlage zur Materialzusammensetzung von EEG und EAG

Weiteren Forschungsbedarf sehen die Autoren hinsichtlich einer Verbesserung der Datengrundlage der Materialzusammensetzung von EEG und EAG. Sowohl die zuständigen Recyclingunternehmen, als auch Forschungsvorhaben wie das Vorliegende, würden von kontinuierlich aktualisierten Daten zur Materialzusammensetzung von EAG profitieren. Recyclingunternehmen können die potentiell recycelbaren Materialmengen von in ihrem Betrieb zu behandelnden EAG genauer einschätzen und die nachfolgenden Prozessschritte besser auf die Materialzusammensetzung abstimmen. Auch lassen sich mit genaueren Zahlen zur Materialzusammensetzung von EEG genauere Prognosen generieren, inwieweit sich die zu erwartenden Massenströme aufgrund von bspw. technischen Innovationen verändern werden. Dieser Punkt ist auch für viele Forschungsvorhaben im Bereich des Elektronikschrottrecyclings interessant, da die Beschaffung von belastbaren Materialzusammensetzungen von EEG, beispielsweise durch eigene Messinitiativen, in der Regel mit verhältnismäßig hohem Aufwand bei oft nur punktuellen und kleinen Stichprobenumfängen verbunden ist.

Um die derzeitige Datengrundlage zu verbessern, schlagen die Autoren zwei Ansätze vor, die idealerweise parallel verfolgt werden. Die genaue Zusammensetzung eines Elektronikgerätes wird in der Regel bereits in der Produktentwicklung durch die verbauten Komponenten bestimmt. Diese Informationen stehen den Herstellern teilweise zur Verfügung und könnten in einer erweiterten „Bill of Material“ als obligatorische Information bereitzustellen sein. Als zweiten Ansatz schlagen die Autoren vor, die derzeitigen Datenerhebungen in der Erstbehandlung von EAG weiter aufzufächern und stichprobenartig nach einzelnen Produktgruppen zu quantifizieren. Mittelfristig ließen sich hierdurch die Massenströme von EAG genauer quantifizieren und notwendige Ressourcen und Prozessschritte im stofflichen Recycling besser planen. Zur Datengewinnung in der Erstbehandlung hinsichtlich der Geräteverteilung und der Materialzusammensetzung der gesammelten EAG, wird eine stichprobenartige Mess-

kampagne in möglichst repräsentativ ausgewählten Erstbehandlungsanlagen deutschland- oder idealerweise europaweit vorgeschlagen. Die ermittelten Daten könnten aggregiert in einer Datenbank der Öffentlichkeit verfügbar gemacht werden.

## 7.2 Verbesserung der Kreislaufführbarkeit von Polymerwerkstoffen

Die Kreislaufführbarkeit von Polymerwerkstoffen wird ebenfalls als Themengebiet mit weiterem Forschungsbedarf angesehen. Hier wird von den Autoren in zwei Themenbereichen Entwicklungspotential gesehen. Die Erhöhung der Nutzung von Kunststoffrezyklaten in der Produktion sowie die Verbesserung der Kreislaufführbarkeit von flammgehemmten Kunststoffen. Auf EU-Ebene sind solche Forschungsvorhaben bereits in der Durchführung (z.B. das EU Horizont 2020 Projekt PolyCE<sup>30</sup>).

## 7.3 Einfluss von Fügetechniken auf die automatisierte Zerlegung von EAG

In diesem und zahlreichen anderen Forschungsvorhaben wurde der Einfluss von Fügstellen (bspw. Kleb-, Schweiß- oder Schraubverbindung) auf die Demontagefähigkeit von elektronischen Geräten beleuchtet. Bei manuellen Zerlegeprozessen kann eine Unterteilung in lösbare und nichtlösbare Verbindungen erfolgen. Im Recyclingprozess kann aber vielfach aus wirtschaftlichen Gründen keine manuelle Demontage erfolgen. In der Folge wird der Großteil der EAG-Zerlegung in Deutschland automatisiert durch schneidende oder brechende Prozessschritte realisiert. Um den Einfluss der verwendeten Verbindungstechnik in den zu recycelnden EAG zu beurteilen, wird von den Autoren eine praxisnahe Untersuchung vorgeschlagen. Mit Partnern aus der Recyclingwirtschaft sollen hinreichend große Stichproben an EAG hinsichtlich ihrer Verbindungsstellen qualifiziert und sortiert werden. Die Sortierung wird mittels der in der DIN 8593 definierten Fügetechniken und ihrer Lösbarkeit durchgeführt. Stehen ausreichend EAG in den Stichproben zur Verfügung, werden diese in die übliche automatisierte Zerlegung gegeben und der Grad der Trennung der Komponenten zwischen den Stichproben verglichen.

## 7.4 Beispiele für nachhaltige Produktkonzeption

Neben den etablierten, weltweit agierenden Herstellern von EEG treten in den letzten Jahren vermehrt Start-Ups in den Vordergrund, wenn es um nachhaltige Produktkonzepte geht. Abbildung 77 illustriert einige dieser Produktkonzepte bzw. bereits am Markt erhältliche Produkte, die den Gedanken der Nachhaltigkeit als wesentliches Konzept zugrunde liegt.

Abbildung 77: Ausgewählte Beispiele für Produkte, die auf nachhaltigen Konzepten basieren

---



Pangea Sun: Konzept für ein modulares Notebook zur vereinfachten Reparatur- und Aufrüstfähigkeit eines Berliner Start-Up Unternehmens, das neben der Umwelt auch soziale Aspekte im Fokus hat.

Quelle: Pangea<sup>31</sup>

---

<sup>30</sup> [https://www.izm.fraunhofer.de/de/abteilungen/environmental\\_reliabilityengineering/projekte/polyce.html](https://www.izm.fraunhofer.de/de/abteilungen/environmental_reliabilityengineering/projekte/polyce.html)

<sup>31</sup> <http://www.pangeaelectronics.com/sun.html>



Fairphone 2: Smartphone mit interner Modularität zur vereinfachten Reparatur- und Aufrüstkfähigkeit des niederländischen Unternehmens Fairphone B.V., das auch soziale Werte im Fokus hat. Die Ökobilanz untermauert den positiven Effekt der Reparierbarkeit (Proske et al. 2016).

Quelle: Fairphone<sup>32</sup>

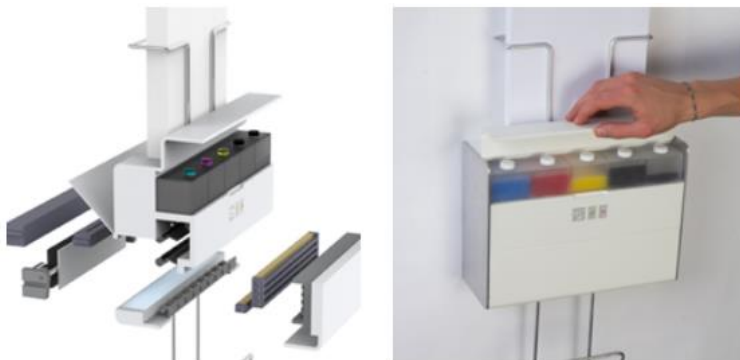
---



Puzzlephone: Konzept für ein modulares Smartphone vom finnischen Start-Up Circular Devices. Das Konzept denkt bereits die Weiternutzung der einzelnen Module mit („Life Cycle Thinking“).

Quelle: Puzzlephone<sup>33</sup>

---



Konzept für einen modularen Drucker zweier Studenten der HfG Schwäbisch Gmünd, das den Bundespreis Ecodesign 2014 gewann.<sup>34</sup>

Quelle: Bundespreis Ecodesign<sup>35</sup>

---

<sup>32</sup> <https://www.fairphone.com/de/>

<sup>33</sup> <http://www.puzzlephone.com/>

<sup>34</sup> <https://www.bundespreis-ecodesign.de/de/wettbewerb/2014/preistraeger14.html>

<sup>35</sup> <http://www.puzzlephone.com/>

## 8 Literaturverzeichnis

- Angerer, Gerhard; Erdmann, Lorenz; Marscheider-Weidemann, Frank; Scharp, Michael; Lüllmann, Arne; Handke, Volker; Marwede, Max (2009): Rohstoffe für Zukunftstechnologien. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag.
- Ardente, Fulvio; Mathieux, Fabrice (2012): Integration of resource efficiency and waste management criteria in European product policies – Second phase. Report n° 2 Application of the project’s methods to three product groups (final): European Commission (EC), Joint Research Centre (JRC), Institute for Environment and Sustainability (IES).
- Bartnik, Sabine; Löhle, Stephan; Müller, Mareen; Kerkhoff, Martina (2013): Recyclinggerechte Produktkonzeption von Elektro- und Elektronikgeräten - Erstellung eines Kriterienkatalogs zur Bemessung und dessen praktische Anwendung, zuletzt geprüft am 05.02.2018.
- Blau, Evelyn; Weiß, Norbert; Wenisch, Antonia (1997): Die Reparaturgesellschaft. Das Ende der Wegwerfkultur. Wien: ÖGB-Verl.
- Bobba, Silvia; Ardente, Fulvio; Mathieux, Fabrice: Durability assessment of vacuum cleaners - Technical support for Environmental Footprinting, material efficiency in product policy and the European Platform on LCA, JRC, November 2015
- Chancerel, Perrine (2010a): Substance flow analysis of the recycling of small waste electrical and electronic equipment. An assessment of the recovery of gold and palladium.
- Chancerel, Perrine (2010b): Substance flow analysis of the recycling of small waste electrical and electronic equipment - An assessment of the recovery of gold and palladium. Technische Universität Berlin. Online verfügbar unter <http://opus.kobv.de/tub-berlin/volltexte/2010/2590/>.
- Chancerel, Perrine; Bolland, Til; Rotter, Vera Susanne (2011): Status of pre-processing of waste electrical and electronic equipment in Germany and its influence on the recovery of gold. In: *Waste Management & Research* 29 (3), S. 309–317.
- Chancerel, Perrine; Marwede, Max (2016): Feasibility study for setting-up reference values to support the calculation of recyclability / recoverability rates of electr(on)ic products.
- Chancerel, Perrine; Meskers, Christina E M; Hagelüken, Christian; Rotter, Vera Susanne (2009): Assessment of Precious Metal Flows During Preprocessing of Waste Electrical and Electronic Equipment. In: *Journal of Industrial Ecology* 13 (5), S. 791–810. DOI: 10.1111/j.1530-9290.2009.00171.x.
- Chancerel, Perrine; Rotter, Susanne (2009): Recycling-oriented characterization of small waste electrical and electronic equipment. In: *Waste management* 29 (8), S. 2336–2352. DOI: 10.1016/j.wasman.2009.04.003.
- Clemm, Christian; Mähltitz, Paul; Schlösser, Alexander; Prof. Dr.-Ing. Dr. sc. techn. Lang, Klaus-Dieter; Prof. Dr.-Ing. Rotter, Vera Susanne (2016a): Umweltwirkungen von wiederaufladbaren Lithium-Batterien für den Einsatz in mobilen Endgeräten der Informations- und Kommunikationstechnik (IKT).
- Clemm, Christian; Sinai, Christoph; Ferkinghoff, Christian; Dethlefs, Nils; Nissen, Nils F.; Lang, Klaus-Dieter (2016b): Durability and Cycle Frequency of Smartphone and Tablet Lithium-ion Batteries in the Field. Piscataway, NJ: IEEE, zuletzt geprüft am 01.02.2018.
- Counterpoint Research (2017): Annual Best selling Smartphones Europe. Sales volume in Millions Units.
- BS 8887-1: 2006: Design for manufacture, assembly, disassembly and end-of-life processing (MADE) – Part 1: General concepts, process and requirements.
- Dethlefs, Nils (2017): Elektrische Untersuchungen zu Alterungsmechanismen an kommerziellen Lithium-Polymerbatterien und Ableitung von Parametern für Zelldegradationsmodelle. Masterarbeit, 2017.
- Dimitrova, Gergana (ohne Jahr): Report on proposed Ecodesign Policy Concept and recommendation to strengthen Design for Recycling and the usage of post-consumer recycled plastics in new products Deliverable D9.3. EU Horizont 2020 Projekt CloseWEEE.
- Eco Mark Product Category No. 119: Personal Computers Version 3.0. Certification Criteria. Online verfügbar unter <https://www.ecomark.jp/english/nintei.html>, zuletzt geprüft am 30.01.2018.
- Elwert, Tobias; Hoffmann, Matthias; Schwarz, Sabrina (2017): Can Recycling of NdFeB Magnets be expected in Europe Before 2030?. European Metallurgical Conference 2017, Leipzig, Volume: 3.
- Euromonitor (2015): Electric Toothbrushes Thrive in Developed Markets. Online verfügbar unter <https://blog.euromonitor.com/2015/04/electric-toothbrushes-thrive-in-developed-markets.html>, zuletzt geprüft am 05.02.2018.
- Europäische Kommission (2012): Richtlinie 2012/19/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 4. Juli 2012 über Elektro- und Elektronik-AltgeräteText von Bedeutung für den EWR, zuletzt geprüft am 05.02.2018.
- European Commission (2014): Report on critical raw materials for the EU. Report of the Ad hoc Working Group on defining critical raw materials.
- European Commission (2015): Critical Raw Materials. Online verfügbar unter [http://ec.europa.eu/growth/sectors/raw-materials/specific-interest/critical/index\\_en.htm](http://ec.europa.eu/growth/sectors/raw-materials/specific-interest/critical/index_en.htm), zuletzt aktualisiert am 05.05.2015, zuletzt geprüft am 22.05.2015.

- ElektroG (2015): Gesetz über das Inverkehrbringen, die Rücknahme und die umweltverträgliche Entsorgung von Elektro- und Elektronikgeräten (Elektro- und Elektronikgerätegesetz - ElektroG).
- DIN 31051 (2012-09): Grundlagen der Instandhaltung.
- ONR 192102: 2014: Gütezeichen für langlebige, reparaturfreundliche konstruierte elektrische und elektronische Geräte.
- handyreparatur123: Infografik über kaputte Smartphones, zuletzt geprüft am 02.02.2018.
- IDC (2017a): Absatz von Druckern, Kopierern und Multifunktionsgeräten weltweit von 2008 bis 2016 (in Millionen Stück).
- IDC (2017b): Global smartphone shipments forecast 2010-2021.
- IEEE 1874: 2013 (2013): IEEE Standard for Documentation Schema for Repair and Assembly of Electronic Devices.
- investors.com: Anteil von Ultrabooks am weltweiten Notebookabsatz von 2011 bis 2015. In Statista - Das Statistik-Portal. Online verfügbar unter <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/214773/umfrage/anteil-von-ultrabooks-am-notebookabsatz-weltweit-bis-2015/>., zuletzt geprüft am 05.02.2017.
- Lin, Sheng-Lun; Huang, Kuo-Lin; Wang, I-Ching; Chou, I-Cheng; Kuo, Yi-Ming; Hung, Chung-Hsien; Lin, Chitsan (2016): Characterization of spent nickel–metal hydride batteries and a preliminary economic evaluation of the recovery processes. In: *Journal of the Air & Waste Management Association* 66 (3), S. 296–306. DOI: 10.1080/10962247.2015.1131206.
- Maya-Drysdale, Larisa; Peled, Michelle; Wood, Jonathan; Rames, Mette; Viegand, Jan (2017): Preparatory study on the Review of Regulation 617/2013 (Lot 3) Computers and Computer Servers. Task 7.1 report Presentation of policy measures. Final version for consultation. Online verfügbar unter <https://computerregulationreview.eu/sites/computerregulationreview.eu/files/Preparatory%20study%20on%20review%20computer%20regulation%20-%20Task%207.1%20VM%2002022017.pdf>, zuletzt geprüft am 02.02.2018.
- DIN CEN/TS 16524: 2013: Mechanische Produkte – Methodik zur Verminderung der Umweltauswirkungen bei Produktgestaltung und Entwicklung.
- Mudgal, Shailendra; Tinetti, Benoît; de Prado Trigo, Alvaro; Faninger, Thibault; Proske, Marina; Schischke, Karsten (2013): Material-efficiency Ecodesign Report and Module to the Methodology for the Ecodesign of Energy-related Products (MEErP), Part 2 – Enhancing MEErP for Ecodesign. Prepared for: European Commission – DG Enterprise and Industry.
- Müller, Tobias; Friedrich, Bernd (2006): Development of a recycling process for nickel-metal hydride batteries. In: *Journal of Power Sources* 158 (2), S. 1498–1509. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2005.10.046.
- Prakash, Siddharth; Dehoust, Günther; Gsell, Martin; Schleicher, Tobias; Stamminger, Rainer (2016): Einfluss der Nutzungsdauer von Produkten auf ihre Umweltwirkung: Schaffung einer Informationsgrundlage und Entwicklung von Strategien gegen „Obsoleszenz“. Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte\\_11\\_2016\\_einfluss\\_der\\_nutzungsdauer\\_von\\_produkten\\_obsoleszenz.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte_11_2016_einfluss_der_nutzungsdauer_von_produkten_obsoleszenz.pdf), zuletzt geprüft am 07.11.2016.
- Proske, Marina; Clemm, Christian; Richter, Nikolai (2016): Life Cycle Assessment of the Fairphone 2.
- RAL-UZ 106 (2017): Vergabegrundlage für Umweltzeichen Mobiltelefone, 2017. Online verfügbar unter <https://www.blauer-engel.de/de/fuer-unternehmen/vergabegrundlagen>.
- RAL-UZ 145 (2012): Vergabegrundlage für Umweltzeichen - Fernsehgeräte. Online verfügbar unter <https://www.blauer-engel.de/de/fuer-unternehmen/vergabegrundlagen>.
- RAL-UZ 205 (2017): Vergabegrundlage für Umweltzeichen - Bürogeräte mit Druckfunktion (Drucker und Multifunktionsgeräte). Online verfügbar unter <https://www.blauer-engel.de/de/fuer-unternehmen/vergabegrundlagen>, zuletzt geprüft am 30.01.2018.
- RAL-UZ 78 (2017): Vergabegrundlage für Umweltzeichen - Computer und Tastaturen. Online verfügbar unter <https://www.blauer-engel.de/de/fuer-unternehmen/vergabegrundlagen>.
- Richtlinienreihe VDI 2343: Recycling elektrischer und elektronischer Geräte. Online verfügbar unter <https://www.vdi.de/technik/fachthemen/energie-und-umwelt/fachbereiche/ressourcenmanagement/themen/wirtschaften-in-kreislaeufen-allgemein/vdi-2343-elektronische-geraete/>, zuletzt geprüft am 07.11.2016.
- VDI 2243, Juli 2002: Recyclingorientierte Produktentwicklung. Online verfügbar unter [https://www.vdi.de/uploads/tx\\_vdi-rili/pdf/9276187.pdf](https://www.vdi.de/uploads/tx_vdi-rili/pdf/9276187.pdf), zuletzt geprüft am 07.11.2016.
- Reuter, Markus; Hudson, Christian; van Schaik, Antoinette; Heiskane, Kari; Meskers, Christina; Hagelüken, Christian (2013): Metal Recycling - Opportunities, Limits, Infrastructure: United Nations Environment Programme, International Resource Panel, Working Group on the Global Metal Flows. Online verfügbar unter [www.unep.org/resourcepanel/Publications/MetalRecycling/tabid/106143/Default.aspx](http://www.unep.org/resourcepanel/Publications/MetalRecycling/tabid/106143/Default.aspx).
- Richtlinie 2005/64/EG (25.11.2005): Richtlinie 2005/64/EG des europäischen Parlaments und des Rates vom 26. Oktober 2005 über die Typgenehmigung für Kraftfahrzeuge hinsichtlich ihrer Wiederverwendbarkeit, Recyclingfähigkeit und Verwertbarkeit und zur Änderung der Richtlinie 70/156/EWG des Rates (L 310/10). Online verfügbar unter [http://wko.at/up/Altauto-RecyclingRL\\_%20AB\\_2005\\_64.pdf](http://wko.at/up/Altauto-RecyclingRL_%20AB_2005_64.pdf), zuletzt geprüft am 01.11.2016.

- Richtlinie 2009/125/EG (31.10.2009): Richtlinie 2009/125/EG des europäischen Parlaments und des Rates vom 21. Oktober 2009 zur Schaffung eines Rahmens für die Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung energieverbrauchsrelevanter Produkte (L 285/10). Online verfügbar unter <https://www.bmwi.de/BMWi/Redaktion/PDF/P-R/oeeko-design-richtlinie,property=pdf,bereich=bmwi2012,sprache=de,rwb=true.pdf>, zuletzt geprüft am 01.11.2016.
- 2012/19/EU (24.07.2012): Richtlinie 2012/19/EU des europäischen Parlaments und des Rates vom 4. Juli 2012 über Elektro- und Elektronik-Altgeräte (L 197/38).
- Roland Berger (2012): The Lithium-Ion Battery Value Chain. Istanbul, zuletzt geprüft am 01.02.2018.
- Sander, Knut; Gößling-Reisemann, Stefan; Zimmermann, Till; Marschieder-Weidemann, Frank; Wilts, Henning; Schebeck, Liselotte et al. (2016): Ermittlung von Substitutionspotenzialen von primären strategischen Metallen durch Sekundärmaterialien (Kurztitel: Recyclingpotenzial strategischer Metalle) - ReStra -, 2016.
- Sander, Knut; Schilling, Stephanie; Marschieder-Weidemann, Frank; Wilts, Henning; von Gries, Nadia; Hobohm, Julia (2012): Abfallwirtschaftliche Produktverantwortung unter Ressourcenschutzaspekten. Meilensteinbericht. UFOPLAN 3711 95 318.
- Schischke, Karsten et al. (2014): Disassembly of Slates: Design for Repair and Recycling Evaluation. Unter Mitarbeit von Lutz Stobbe. Hg. v. Fraunhofer IZM. Berlin.
- Schlacke, S.; Alt, M.; Tonner, K.; Gawel, E.; Bretschneider, W. (2015): Stärkung eines nachhaltigen Konsums im Bereich Produktnutzung durch Anpassungen im Zivil- und öffentlichen Recht. Im Auftrag des Umweltbundesamtes. Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte\\_72\\_2015\\_staerkung\\_eines\\_nachhaltigen\\_konsums\\_im\\_bereich\\_produktnutzung\\_0.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte_72_2015_staerkung_eines_nachhaltigen_konsums_im_bereich_produktnutzung_0.pdf), zuletzt geprüft am 07.11.2016.
- Schluep, Mathias; Spitzbart, Markus; Blaser, Fabian (2015): Dismantling Guide for IT Equipment, zuletzt geprüft am 04.02.2018.
- Statista (2017): Consumer Market Outlook - Televisions.
- Stiftung Warentest (2016): Kräftig, mobil oder flexibel. In: *Test*, zuletzt geprüft am 01.02.2018.
- Stobbe, Lutz; Proske, Marina; Zedel, Hannes; Hintemann, Ralph; Clausen, Jens; Beuckler, Severin (2015): Entwicklung des IKT-bedingten Strombedarfs in. Abschlussbericht.
- Talens Peiró, Laura; Ardente, Fulvio: Environmental Footprint and Material Efficiency Support for product policy - Analysis of material efficiency requirements of enterprise servers, JRC, September 2015
- Tecchio, Paolo; Ardente, Fulvio; Marwede, Max; Clemm, Christian; Dimitrova, Gergana; Matthieux, Fabrice (2017): Analysis of material efficiency aspects of personal computers product group. Draft report. Joint Research Centre, zuletzt geprüft am 25.01.2018.
- IEC/TR 62635: 2012 (2012): Technical Report - Guidelines for end-of-life information provided by manufacturers and recyclers and for recyclability rate calculation of electrical and electronic equipment.
- PAS 1049: 2004 (2004): Übermittlung recyclingrelevanter Produktinformationen zwischen Herstellern und Recyclingunternehmen – Der Recyclingpass.
- DIN EN 62430: 2010; VDE 0042-2: 2010 (2010): Umweltbewusstes Gestalten von elektrischen und elektronischen Produkten.
- Umweltbundesamt (2017a): Elektro- und Elektronikaltgeräte. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/daten/ressourcen-abfall/verwertung-entsorgung-ausgewaehlter-abfallarten/elektro-elektronikaltgeraete#textpart-1>, zuletzt geprüft am 05.02.2018.
- Umweltbundesamt (2017b): Überblick AG 1 - 5 der UBA-Empfehlungen zu Behandlungsanforderungen an EAG, zuletzt geprüft am 24.01.2018.
- ISO/TR 14062: 2002: Umweltmanagement - Integration von Umweltaspekten in Produktdesign und -entwicklung.
- DIN EN ISO 14006: 2011: Umweltmanagementsysteme – Leitlinien zur Berücksichtigung umweltverträglicher Produktgestaltung.
- van Schaik, Antoinette; Reuter, Markus A. (2017): Fairphone's Report on Recyclability. Does modularity contribute to better recovery of materials? Online verfügbar unter <https://www.fairphone.com/wp-content/uploads/2017/02/FairphoneRecyclabilityReport022017.pdf>, zuletzt geprüft am 05.02.2018.
- Widmer, Rolf; Oswald-Krapf, Heidi; Sinha-Khetriwal, Deepali; Schnellmann, Max; Böni, Heinz (2005): Global perspectives on e-waste (25). In: *Environmental Impact Assessment Review* (5), S. 436–458.
- Winzer, Janis (2016): Leistungsfähigkeit produktpolitischer Instrumente. Dissertation.

## 9 Anhänge

### 9.1 Interviews mit Teilnehmern des Begleitkreises

Um Erkenntnisse darüber zu gewinnen, wie Aufbau, Verbindung und Beschaffenheit von Produkten gestaltet sein müssten, damit eine verbesserte Kreislaufführbarkeit von Edel- und Sondermetallen sowie Kunststoffen aus EAG ermöglicht werden kann, wurden zu Beginn des Forschungsvorhabens Expertenbefragungen in Form von telefonischen Interviews mit einzelnen Personen des Begleitkreises durchgeführt. Ziel der Interviews war es, Informationen über diejenigen Faktoren im Behandlungs- bzw. Recyclingprozess einzuholen, die eine Kreislaufführung von Materialien der jeweiligen Produktgruppe erleichtern, erschweren, bzw. sogar verhindern. Interviews wurden mit sechs Unternehmen aus der Recyclingkette durchgeführt, die sich im Wesentlichen mit der Erstbehandlung von EAG bzw. dem stofflichen Recycling von Edelmetallen und Kunststoffen befassen. Die Erkenntnisse aus den Interviews werden im folgenden Abschnitt in Themengebiete eingeordnet und inhaltlich zusammengefasst. Die Aussagen der Interviewpartner werden ohne fachliche Überarbeitung oder Ergänzung wiedergegeben und sind demnach zutreffend für einzelne Unternehmen und Organisationen und nicht allgemeingültig. Rückschlüsse auf einzelne Unternehmen und Personen sollen nicht gezogen werden können.

#### **Themengebiet 1: Behandlungsprozesse**

Das Themengebiet „Behandlungsprozesse“ beinhaltet Aussagen zum aktuellen Verfahren in der Erstbehandlung, dem Anteil manueller Demontage bei der Erstbehandlung und der Schadstoffentfrachtung.

- ▶ Allgemein gesprochen sind die Behandlungsprozesse von EAG bei den meisten Erstbehandlern ähnlich gestaltet. Zunächst werden bei der Vorsortierung Geräte aussortiert, bei denen ein erhöhter Gehalt an Edelmetallen erwartet wird (z.B. Handys). Diese erzielen höhere Erträge bei der Veräußerung an die Kupfer-/Edelmetallhütten. Die großen Mengen an Haushaltskleingeräten werden i.d.R. zunächst ohne manuelle Vorbehandlung mittels mechanischer Prozesstechnik zerkleinert.
- ▶ Insgesamt hat die manuelle Demontage nur einen geringen Anteil im Behandlungsprozess, bedingt durch hohe Personalkosten und somit großen finanziellen Aufwand manueller Tätigkeiten. Es wird vermutet, dass manuelle Demontagetätigkeiten in Zukunft tendenziell weiter abnehmen werden. Der Trend geht hin zu mechanischen bzw. automatisierten Prozessen.
- ▶ Manuell demontiert wird z.T. noch bei der Schadstoffentfrachtung, dabei werden im Hinblick auf die vier Fallstudien im Vorhaben explizit benannt:
  - CCFL Röhren bei Flachbildschirmen wegen des enthaltenen Quecksilbers,
  - Bildröhren bei CRT Monitoren,
  - Tonerkartuschen bei Druckern,
  - Batterien und Akkus bei batteriebetriebenen Geräten.
- ▶ Bei Fernsehern wird vermutet, dass, bedingt durch den Technologiewechsel hin zu LEDs als Hintergrundbeleuchtung, die entsprechenden TV Geräte zukünftig beim Erstbehandler nur noch maschinell ohne manuelle Vorbehandlung verarbeitet werden (mechanische Zerkleinerung).
- ▶ Bei Tintenstrahldruckern werden i.d.R. die Tintenpatronen entnommen, jedoch ist es für die weiteren Behandlungsprozesse unproblematisch, wenn die Kartuschen im Gerät verbleiben (die Resttinte wird im Stoffstrom dissipativ verteilt).
- ▶ Akkus werden, aufgrund der akuten Brandgefahr, versucht zu entnehmen, dies wird jedoch zunehmend durch das Verbauen und Verkleben der Akkus in Endgeräten erschwert. Teilweise werden die Akkus erst nach einer mechanischen Vorzerkleinerung aus dem resultierenden Stoffstrom händisch aussortiert. Nach aktuellem Stand kommen bislang nur wenige Geräte mit

fest verbauten Akkus bei Erstbehandlern an, daher wird hier noch kein akutes Problem festgestellt.

- ▶ Separierte Akkus werden teilweise bereits nach Typ (Li-Ion, NiCd, NiMH, usw.) vorsortiert, um die Wirtschaftlichkeit zu optimieren.
- ▶ Glas wird als Störstoff im Behandlungsprozess genannt, da das Glas pulverisiert und die Funktionsfähigkeit der Schredder beeinträchtigt, Glasscherben ein Verletzungsrisiko für die Mitarbeiter darstellen und die verschiedenen Fraktionen mit Glas kontaminiert und verunreinigt werden. Der Glasstaub fördert den Verschleiß aller im Behandlungsprozess genutzten Betriebsmittel. Bei Druckern werden die Glasscheiben vor der maschinellen Weiterverarbeitung entfernt (bzw. sollten entfernt werden).
- ▶ Magnesiumrahmen werden wegen ihres pyrophoren Verhaltens als Störstoff im Behandlungsprozess benannt.
- ▶ Kunstharze, mit denen Produkte die im Nassbereich zum Einsatz kommen (Sensorik, elektrische Zahnbürsten) vergossen werden, verkleben Anlagen.

## **Themengebiet 2: Maßnahmen zur Optimierung von Recyclingprozessen**

Das Themengebiet „Maßnahmen zur Optimierung von Recyclingprozessen“ beinhaltet Aussagen dazu, wie der Aufbau des jeweiligen Produktes beschaffen sein müsste, um eine verbesserte Recyclingfähigkeit zu ermöglichen, insbesondere mit Blick auf die Demontagefähigkeit beim Prozess der Erstbehandlung.

- ▶ Allgemein gesprochen sollten schadstoffhaltige und wertstoffhaltige Komponenten leicht entnehmbar sein.
- ▶ Von Vorteil könnte eine verbesserte Separierung von stark wertstoffhaltigen (z.B. Smartphones) und stark schadstoffhaltigen (z.B. Li-Ion-Akkus) Geräten im Sammlungsprozess sein.
- ▶ Li-Ionen-Akkus stellen bei der Behandlung von EAG einen besonders kritischen Gefahrstoff wegen der Explosionsgefahr dar, eine Entfrachtung sollte daher möglichst einfach und schnell umsetzbar sein. Fest verbaute sowie im Gerät verklebte Akkus wurden als negativ für den Behandlungsprozess bewertet.
- ▶ Je nach Gerätetyp sollten folgende Arbeitsschritte möglichst einfach und wenn möglich ohne Werkzeug durchführbar sein:
  - Entnahme von Leiterplatten als Wertstoff
  - Entnahme von Akkus als Schadstoff
- ▶ Bei TVs wurde die Entnahme von Aluminium-Kühlkörpern thematisiert, da diese einen Störstoff in der Edelmetallhütte darstellen.
- ▶ Generell besitzen die Produktgruppen Flachbildschirm-TV und Drucker einen relativ homogenen Aufbau, was die Demontage eher erleichtert.
- ▶ Bei der Produktgruppe der Notebooks wird angemerkt, dass die Abtrennung von „Deckel“ (Displayeinheit) und „Basis“ (Computer, Tastatur) oft schwierig ist, da deren mechanische Verbindung bei jedem Hersteller/Modell unterschiedlich gestaltet ist.
- ▶ Bei Multifunktionsdruckern (mit Kopier-/Scanfunktion) sollte die Glasscheibe leicht entnehmbar sein.
- ▶ Insbesondere bei der Produktgruppe Smartphones/Tablets/Phablets wäre ein modularer Aufbau wie beim Puzzlephone Konzept wünschenswert, bspw. wäre es gut wenn die Gehäuseunterschale mit Akku einfach von der Gehäuseoberschale mit Display und Elektronik trennbar wäre.
- ▶ Eine hohe Anzahl an Schrauben sowie eine Vielzahl verschiedener Schrauben in einem Gerät werden als hinderlich für die Behandlungsprozesse benannt.
- ▶ Nach Möglichkeit werden entnommene Akkus nach Typ (Li-Ion, NiCd, NiMH, etc.) vorsortiert, dies wird jedoch durch eine fehlende Kennzeichnung erschwert, hier wäre eine einheitliche

und gut sichtbare Markierung sinnvoll, da es für die verschiedenen Akkutypen unterschiedliche Abnahmeerlöse gibt.

### **Themengebiet 3: Recycling von Edel- und Sondermetallen**

Das Themengebiet „Recycling von Edel- und Sondermetallen“ beinhaltet Aussagen insbesondere zum Stand und der Aussicht auf verbesserte Recyclingquoten von Sondermetallen.

- ▶ Viele Metalle werden in immer geringeren Konzentrationen in EEG eingesetzt, daher lohnt sich der Aufwand für das Recycling wirtschaftlich immer weniger. Dies trifft insbesondere auf Sondermetalle zu, die in sehr geringen Mengen und Konzentrationen in Geräten vorkommen.
- ▶ Es wird auf die Kurzlebigkeit der Branche (insbesondere IKT) hingewiesen. Wenn ein Recyclingverfahren für eine bestimmte Produkttechnologie entwickelt wird, wurde diese Technologie bei Fertigstellung des Verfahrens womöglich durch eine neue ersetzt. Dies macht eine Abstimmung des Recyclings auf bestimmte Technologien praktisch unmöglich.
- ▶ Ein erhöhtes Potential für die zukünftige Erzielung von Erlösen wird beim Recycling von Magneten, die Neodym enthalten, gesehen.
- ▶ Es wird vorgeschlagen, den Gehalt an Sondermetallen auf der Leiterplatte zu kennzeichnen. So sollte beispielsweise der Gehalt an Tantal dann auf einer Leiterplatte gekennzeichnet sein, wenn er einen bestimmten Prozentsatz übersteigt. Hier wären weitere Untersuchungen notwendig.

### **Themengebiet 4: Kunststoffrecycling**

Das Themengebiet „Kunststoffrecycling“ beinhaltet Aussagen zu Verfahren und insbesondere zu Möglichkeiten, die Kreislaufführbarkeit von Kunststoffen aus EAG zu erhöhen.

- ▶ Wenn Vereinfachungen in der Konstruktion der Endgeräte zunehmen, kann der Vorbehandlungsprozess (manuell oder mechanisch) vereinfacht werden. Jedes vereinfachende Design, das auch die Verarbeitungsfrequenz erhöhen kann, wird die vorgeschalteten manuellen und mechanischen Prozesse unterstützen und zur Zunahme der Sortenreinheit bei der Materialtrennung führen.
- ▶ Kunststoffgehäuse von EAG sollten möglichst durch einen Arbeitsschritt schnell und sortenrein abtrennbar sein. Ein einfaches Abtrennen der Gehäuse würde den Gesamtprozess unterstützen und dazu führen, dass die richtigen Fraktionen den effektivsten Weg gehen.
- ▶ In der metallurgischen Verarbeitung ist es wichtig, dass Gehäusekunststoffe, die nur Trägermaterialien sind und keine Leiterfunktion haben, möglichst einfach abzutrennen sind. Hier sollten keine Verbindungen mit Leiterplatten bestehen.
- ▶ Eine Limitierung der Vielfalt eingesetzter Kunststoffe in EEG wird als wichtiger Schritt für verbesserte Recyclingfähigkeit gesehen, da eine Vielfalt versch. Kunststofftypen mit einer Vielzahl von Additiven nur sehr schlecht rezyklierbar ist. Je einfacher die Kunststoffe in ihrer Zusammensetzung, desto effizienter kann das Kunststoffrecycling funktionieren.
- ▶ ABS und HIPS ohne Flammschutzmittel in Schwarz oder Anthrazit werden, mit Blick auf die aktuellen Separations- und Recyclingverfahren, als ideale Kunststoffe für größere Elektrogeräte wie z.B. Fernseher benannt.
- ▶ Flammschutzmittel behindern die Trennverfahren nicht, da sie im Schwimm-Sink-Verfahren zur Kunststofftrennung aufgrund ihrer höheren Dichte (im Vergleich zu Kunststoffen ohne Flammschutzmittel) absinken. Flammschutzmittelhaltige Kunststoffe gehen dem Stoffkreislauf mit diesem Trennverfahren demnach jedoch verloren. Andere Trennverfahren wurden nicht diskutiert.
- ▶ Bei der Aufbereitung von gemischten Kunststoffen aus E-Schrott wird Gummi als Störstoff angegeben, da dieser durch die Schmelzfiltration nur sehr schwer entfernbar ist.

- ▶ Ein weiteres Problem wird in der oftmals falschen Kunststoffkennzeichnung gesehen. Wenn die Kennzeichnung verlässlich wäre, könnte auch mehr Kunststoff in Reinfractionen separiert werden, insbesondere würden halogenfreie Kunststoffe separat gesammelt werden, da mit diesen höhere Erträge erwirtschaftet werden können.
- ▶ Die größte Herausforderung beim Kunststoff-Recycling besteht im Fehlen eines Marktes für „post-consumer recycled (PCR)“ Kunststoff. Hier stellt sich die Frage, wie ein solcher Markt aufgebaut werden kann und ob es möglich ist, den Einsatz von Rezyklaten durch die Gesetzgebung vorzuschreiben.
- ▶ Damit die Rezyklate überhaupt eingesetzt werden können, sollte Ökodesign darauf hinwirken, die Verwendung von bunten Kunststoffen zu vermeiden und den Einsatz schwarzer Kunststoffe zu erhöhen. Während schwarze Kunststoffe relativ leicht als Sekundärmaterial in Geräte eingebracht werden können, ist dies mit Rezyklat aus bunten Kunststoffen nicht ohne Weiteres der Fall, bedingt durch ästhetischen Ansprüchen der Hersteller und Kunden. Solche Rezyklate können allenfalls nur im Geräteinneren eingesetzt werden.

## 9.2 AP1: Untersuchung der Normung von Aspekten der Materialeffizienz

### 9.2.1 Hintergrund und Ziele

Um Ressourcenschutz durch produktbezogenen Umweltschutz zu erzielen, hat die Gesellschaft, insbesondere der Staat, direkte und indirekte Instrumente zur Verfügung. Neben u. a. ordnungsrechtlichen Gesetzen ist die Normung eines dieser Instrumente. Ein Arbeitspaket (AP1) des Forschungsvorhabens hatte zum Ziel, bestehende und sich in Entwicklung befindende Normen und Anleitungen im Produktbereich zu identifizieren, zu bewerten und Handlungsempfehlungen für den produktpolitischen Instrumentenmix abzuleiten. Auch sollte es dazu dienen, die europäische Normungsarbeit, insbesondere das Normungsmandat M/543<sup>36</sup> zu unterstützen. Die folgenden Normen, Standards und Anleitungen (im Folgenden: Standards) wurden identifiziert und für das Forschungsvorhaben und die Fragestellung als relevant eingestuft:

- ▶ IEC/TR 62635: 2012-10 - Guidelines for the end-of-life information provided by manufacturers and recyclers and for the recyclability rate calculation of electrical and electronic equipment
- ▶ IEEE 1874: 2013 - Standard for Documentation Schema for Repair and Assembly of Electronic Devices
- ▶ PAS 1049: 2004 – Übermittlung recyclingrelevanter Produktinformationen zwischen Herstellern und Recyclingunternehmen - Der Recyclingpass
- ▶ ONR 192102: 2014 – Gütezeichen für langlebige, reparaturfreundlich konstruierte elektrische und elektronische Geräte
- ▶ BS 8887-1: 2006 – Design for manufacture, assembly, disassembly and end-of-life processing (MADE) – Part 1: General concepts, process and requirements
- ▶ Richtlinienreihe VDI 2343 – Recycling elektrischer und elektronischer Geräte
- ▶ Richtlinienreihe VDI 2243 – Recyclingorientierte Produktentwicklung
- ▶ DIN CEN/TS 16524: 2013-12 (D) – Mechanische Produkte - Methodik zur Verminderung der Umweltauswirkungen bei Produktgestaltung und Entwicklung
- ▶ DIN EN 62430: 2010; VDE 0042-2: 2010 – Umweltbewusstes Gestalten von elektrischen und elektronischen Produkten

---

<sup>36</sup> Durchführungsbeschluss der Kommission vom 17.12.2015 über einen Normungsauftrag an die europäischen Normungsorganisationen im Hinblick auf die umweltgerechte Gestaltung in Bezug auf Aspekte der Materialeffizienz bei energieverbrauchsrelevanten Produkten zur Unterstützung der Umsetzung der Richtlinie 2009/125/EG des Europäischen Parlaments und des Rates (C(2015) 9096 final).

- ▶ ISO/TR 14062: 2002 – Umweltmanagement - Integration von Umweltaspekten in Produktdesign und -entwicklung
- ▶ DIN EN ISO 14006: 2011 – Umweltmanagementsysteme - Leitlinien zur Berücksichtigung umweltverträglicher Produktgestaltung
- ▶ iFixit Repairability Scorecard (keine Norm, aber in Absprache mit dem Auftraggeber dennoch einzubeziehen)

Zur Auswertung wurden die Inhalte der Standards zusammenfassend beschrieben und anhand von festgelegten Kriterien untersucht und bewertet. Als relevant für die Ziele des Arbeitspaketes wurden folgende Aspekte betrachtet:

- ▶ Reparierbarkeit (insbesondere die Vereinheitlichung von Angaben zur Reparierbarkeit)
- ▶ Demontage
- ▶ Berechnung der Recyclingfähigkeit
- ▶ Messbarkeit (insbesondere Zeitdauern von Prozessschritten bei der Vorbereitung zur Wiederverwendung oder Zerlegeprozessen von Elektro(nik)produkten)
- ▶ Lebensdauer (generelle Aspekte zur Produktlebensdauerverlängerung)
- ▶ Bezugnahme auf Edel- und Sondermetalle sowie Kunststoffe

Die Evaluierung sollte dazu dienen, die Anwendbarkeit und evtl. Hürden für die Anwendung zu untersuchen und zu bewerten. Dabei ist zwischen der Anwendung auf freiwilliger Basis und in verbindlichen produktpolitischen Instrumenten zu unterscheiden. Darauf aufbauend sollten im Arbeitspaket Handlungsempfehlungen zur Weiterentwicklung und Implementierung entwickelt werden.

## 9.2.2 Erläuterungen zu ausgewählten Prüfkriterien

### Anwendungsbereich

Normen und Anleitungen haben in der Regel einen definierten Anwendungsbereich. Im Forschungsvorhaben wird unterschieden zwischen nicht-energieverbrauchsrelevanten Produkten und energieverbrauchsrelevanten Produkten mit besonderem Fokus auf die Untergruppe Elektro(nik)geräte.

### Reparierbarkeit

Reparatur wird im Sinne des Forschungsvorhabens verstanden als:

Alle Maßnahmen zur Wiederherstellung bzw. Erhaltung der Funktionsfähigkeit und der Gebrauchstauglichkeit von Produkten (Investitionsgüter und Gebrauchsgüter) (Blau et al. 1997).

Eine Reparaturmöglichkeit ist im Rahmen der Nutzungsphase von Elektro(nik)geräten relevant und gewünscht. Die Möglichkeit ein Produkt reparieren zu können, stellt in vielen Produktgruppen einen signifikanten Hebel zur Material- und Ressourcenschonung dar. Der gleichzeitige Ausfall von vielen oder allen Baugruppen eines Produktes stellt i.d.R. die Ausnahme dar. Demnach geht es beim Aspekt der Reparierbarkeit vorwiegend darum, ob ein Produkt wieder zu seiner beabsichtigten Bestimmung hergerichtet werden kann, so dass es erneut die ursprünglich festgelegten Anforderungen des beabsichtigten Gebrauchs erfüllt. Können Produkte repariert werden, steigen die potenzielle Nutzungsdauer des Produktes und somit auch die Ressourceneffizienz. Des Weiteren wird dem Ziel der Kreislaufwirtschaft Rechnung getragen und der Abfallproblematik entgegengewirkt. Zudem wird die Erschließung neuer Rohstoffquellen verlangsamt.

Der Aspekt der Reparierbarkeit ist als eindeutig formulierte Anforderung im aktuellen verpflichtenden produktpolitischen Instrumentenmix nicht verankert. Im freiwilligen Instrumentenmix stellen insbesondere Label Anforderungen an die Reparierbarkeit. In den ordnungsrechtlichen Instrumenten wird Reparierbarkeit häufig sinngemäß adressiert, jedoch teils in unterschiedlichen Zusammenhängen verwendet. In der Ökodesign-RL werden zudem Indikatoren zum Aufzeigen der Produktlebensdauer aufgeführt, Reparierbarkeit ist ein Indikator. Schriften des VDI (bspw. VDI 2243) oder DIN verwenden

zudem häufig den Begriff Instandsetzung, wobei Instandhaltung oft weiter gefasst ist. Als Instandhaltung sind bspw. nach DIN 31051 sämtliche Maßnahmen zur Bewahrung des Sollzustandes (auch Wartung), zur Feststellung und Beurteilung des Istzustandes (auch Inspektion) und zur Wiederherstellung des Sollzustandes (allg. Instandsetzung) definiert. VDI und DIN beschreiben in ihren Normen, Richtlinien u. Leitfäden Instandsetzung an der Schnittstelle zwischen Instandhaltung technischer Produkte und Recycling technischer Produkte.

### **Wiederverwendung**

Unter Wiederverwendung wird im Sinne des Forschungsvorhabens verstanden:

Maßnahmen, bei denen Produkte (Investitionsgüter und Gebrauchsgüter) oder deren Bauteile zu dem gleichen Zweck verwendet werden, für den sie hergestellt oder in Verkehr gebracht wurden [§ 3, Abs. 6, ElektroG].

Wiederverwendung im Sinne des Kreislaufwirtschaftsgesetzes (KrWG) ist jedes Verfahren, bei dem Erzeugnisse oder Bestandteile, die keine Abfälle sind, wieder für denselben Zweck verwendet werden, für den sie ursprünglich bestimmt waren [§ 3, Abs. 21, KrWG]

### **Demontage**

Demontage wird im Sinne des Forschungsvorhabens verstanden als:

Alle Maßnahmen, die der Zerlegung funktionsfähiger oder nicht mehr funktionsfähiger Produkte (Investitionsgüter und Gebrauchsgüter) dienen.

Im Unterschied zur Reparierbarkeit wird bei der Demontage die Entsorgung und Verwertung von Elektro(nik)altgeräten adressiert. Der Konsument hat in dieser Phase seinen Entledigungswillen<sup>37</sup> bereits zum Ausdruck gebracht. Das Produkt ist durch eine Handlung des Konsumenten, z.B. die Abgabe an einer öffentlich-rechtlichen Sammelstelle, bei bspw. einem Erstbehandler angekommen und wird zerlegt. Bei der Zerlegung handelt es sich i.d.R. um eine manuelle Demontage, die durch Menschenhand durchgeführt wird. Das Ziel der Demontage besteht in der gezielten Entnahme wert- und schadstoffhaltiger Bauteile (Entfrachtung) sowie der Gewinnung wiederverwendbarer Bauteile und Baugruppen. Die Demontage wird i.d.R. durch qualifiziertes Personal durchgeführt und dient dazu, zunächst besagte Baugruppen zu separieren, die entweder aufgrund von gesetzlichen Bestimmungen (Batterien/Akkumulatoren, Leistungskondensatoren) entfernt werden müssen, oder deren Beschaffenheit so ist, dass höhere Gewinne durch höherwertige Recyclingverfahren zu erwarten sind (z.B. großer Masseanteil eines einzelnen Wertstoffes). Durch Demontage können Fraktionen (z.B. elektronische Baugruppen) gezielt behandelt werden, ggf. können einzelne Teile oder Gruppen zur Wiederverwendung vorbereitet werden, in anderen Fällen können aufkonzentrierte Fraktionen ressourcenschonender und gewinnbringender recycelt werden. Können Produkte nicht demontiert werden, oder nicht in einer verhältnismäßig kurzen Zeit, werden sie direkt in maschinelle Zerkleinerungsverfahren (bspw. Querstromzerspaner) und pyrometallurgische Prozesse (bspw. Hochofen) gegeben. Vorteil dieser Handhabung sind Kosteneinsparungen und teils hohe Rückgewinnungsraten einzelner Metalle. Nachteil ist, dass viele Stoffe, speziell Edel- und Sondermetalle, etc. verloren gehen.

### **Recyclingfähigkeit**

Recyclingfähigkeit wird im Sinne des Forschungsvorhabens verstanden als:

Das mögliche Recyceln von Bauteilen oder Werkstoffen aus Produkten [vgl. Richtlinie Richtlinie 2005/64/EG (idF. v. 26. Oktober 2005)].

---

<sup>37</sup> Ein Entledigungswille wird gesetzlich unterstellt, wenn der ursprüngliche Zweck einer Sache aufgegeben wird, und kein unmittelbar neuer Zweck vorhanden ist. Unmittelbar bedeutet hier „ohne weitere Veränderung“ der Sache.

Neben dem im Produkt enthaltenen Anteil an bereits recycelten Materialien ist der Anteil an recyclingfähigen Materialien von hohem produktpolitischem Interesse. Weitgehend geschlossene Rohstoffkreisläufe können dann erreicht werden, wenn die Recyclingfähigkeit eines Produktes hoch ist. Um die Recyclingfähigkeit bestimmen zu können, bedarf es u.a. geeigneter Berechnungsmethoden.

Als Berechnung der Recyclingfähigkeit wird im Sinne des Forschungsvorhabens verstanden:

Die Möglichkeit durch Berechnung den Gehalt an Materialien eines funktionsfähigen oder nicht mehr funktionsfähigen Produktes (Investitionsgüter und Gebrauchsgüter), die recycelt werden können, zu bestimmen.

### Produktlebensdauer

Produktlebensdauer wird im Sinne des Forschungsvorhabens verstanden als:

Die Zeitspanne, in der ein Produkt die zum Erwerbszeitpunkt maßgeblichen Funktionen technisch abzugeben in der Lage ist, einschließlich der Lebensverlängerungsspanne durch ökonomisch verhältnismäßige Reparaturen (Schlacke et al. 2015).

Produktlebensdauer im engeren Sinne wird verstanden als:

Die Zeitspanne, in der ein Produkt die zum Erwerbszeitpunkt maßgeblichen Funktionen technisch ohne wesentliche Funktionsstörung abzugeben in der Lage ist (Schlacke et al. 2015).

Der Aspekt Produktlebensdauer erfährt in der produktpolitischen Diskussion derzeit hohe Aufmerksamkeit. Produkte und insbesondere Elektro(nik)geräte weisen heute teils geringe Nutzungsdauern auf und werden schnell zu Abfall. Diverse Probleme in den Recyclingprozessen führen zu hohen Verlusten von Rohstoffen. Produkte möglichst spät in Recyclingprozesse zu überführen und lange in der Nutzung zu halten, stellt daher einen wirksamen Hebel zur Ressourcenschonung dar.

Bezugnahme auf wirtschaftsstrategische und ökologisch kritische Metalle und Kunststoffe

Der Begriff der wirtschaftsstrategischen Rohstoffe wird im Sinne des Forschungsvorhabens verstanden als die kritischen Rohstoffe (CRM: critical raw materials) im Sinne der EU Kommission (European Commission 2015). Kritikalität ist demnach der Maßstab für das Versorgungsrisiko und die wirtschaftliche Bedeutung der verwendeten Rohstoffe in einem Produkt. Die Beurteilung der Kritikalität ist ein weites Forschungsfeld und das Ergebnis hängt stark von den gewählten Bewertungskriterien ab. Die Europäische Kommission veröffentlichte 2010 eine Methode um Rohstoffe zu identifizieren, die mit einem hohen Versorgungsrisiko und großer wirtschaftlicher Bedeutung für den europäischen Markt verbunden sind. Die Resultate werden alle drei Jahre überprüft, inzwischen werden neben 51 abiotischen Rohstoffen auch drei biotische Rohstoffe einbezogen. Die EU-Liste aus dem Jahr 2014 enthält insgesamt 20 Rohstoffe, von denen viele in der Elektronikindustrie Verwendung finden (die Auflistung im Kasten unten dem entsprechenden Bericht entnommen (European Commission 2014)), für die Elektronik wesentliche relevante Stoffe sind durch die Autoren fett markiert:

<b>Antimon</b>	<b>Beryllium</b>	Borate	Chrom	<b>Kobalt</b>	Kokskohle	Flussspat
<b>Gallium</b>	<b>Germanium</b>	<b>Indium</b>	Magnesit	<b>Magnesium</b>	<b>Graphit</b>	<b>Niobium</b>
<b>PGMs</b>	Phosphatgestein	<b>SEM (schwer)</b>	<b>SEM (leicht)</b>	<b>Silizium</b>	<b>Wolfram</b>	

Kunststoffrecycling ist für Produkte der Elektronikindustrie nach wie vor eine anspruchsvolle Aufgabe. Aufgrund des niedrigen Erdölpreises und der vielen Kunststoffsorten werden die zurückgewonnenen Kunststoffe aus Recyclingprozessen heute mehrheitlich energetisch verwertet. Auch aufgrund des Problems der schwierigen Identifizierung nicht nur der Polymertypen selbst, sondern auch der Zusatzstoffe, wie Flammschutzmittel, Weichmacher, Schwermetalle und andere Bestandteile, wird bisher nur ein geringer Teil der Kunststoffe stofflich zurückgewonnen.

### 9.2.3 Auswertung der ausgewählten Normen und Standards

**Norm: IEC/TR 62635: 2012-10**

#### **IEC/TR 62635: 2012-10 - Guidelines for the end-of-life information provided by manufacturers and recyclers and for the recyclability rate calculation of electrical and electronic equipment**

Der IEC/TR 62635 ist ein technischer Bericht der Internationalen Elektrotechnischen Kommission (IEC) aus dem Jahr 2012. Der Bericht gibt eine Methodik für den Informationsaustausch zwischen Herstellern und Recyclern von Elektronik und elektronischen Geräten sowie eine Methodik für die Berechnung von Recycling- und Verwertungsquoten vor. Anhand des technischen Berichts können Hersteller ein einheitliches Format und eine einheitliche Methode nutzen, um den End-of-Life<sup>38</sup> (EoL) Aspekt der Ressourceneffizienz für umweltbewusstes Design (Environmentally Conscious Design (ECD)) zu dokumentieren. Der Bericht befasst sich mit drei wesentlichen Aspekten:

- ▶ einer Beschreibung von End-of-Life Grundsätzen,
- ▶ einer Beschreibung der wichtigsten Produktinformationen sowie
- ▶ einer Beschreibung der Methodik zur Berechnung von Recycling- und Verwertungsquoten.

#### **Anwendungsbereich**

Die IEC/TR 62635: 2012 bezieht sich explizit auf Elektro- und Elektronikgeräte (EEG).

#### **Demontage**

Die Norm beschreibt eine Vorgehensweise für Hersteller, wie sie Informationen über ein Produkt und dessen Komponenten an Recyclingunternehmen übermitteln sollten, damit diesen die Ausführung von optimierten End-of-Life Arbeitsabläufen erleichtert werden kann. Demnach soll der Hersteller Produktteile sowie deren Masse und Position im Gerät nach folgenden Kriterien auflisten:

- ▶ Potentielle Risiken für Personal bei Behandlungs- und Recyclingunternehmen (z.B. Batterien/Akkumulatoren und Leistungskondensatoren)
- ▶ Wiederverwendbare Teile
- ▶ Teile zur selektiven Behandlung (z.B. Batterien und Teile, die polychlorierten Biphenyle enthalten)
- ▶ Teile aus einem einzigen, recyclingfähigen Material, so dass bei separater Behandlung eine höhere Recyclingquote zu erwarten ist
- ▶ Teile, die im EoL schwer zu verarbeiten sind (z.B. aufgrund von Größe, Materialeigenschaften)

Dazu gehören Skizzen, Zeichnungen oder Bilder, um die visuelle Identifikation der jeweiligen Produktteile zu ermöglichen. Des Weiteren wird empfohlen, dass Hersteller Informationen zum Vorgehen bei der Demontage bereitstellen (z.B. Beschreibung der Arbeitsschritte, benötigter Werkzeuge, usw.). Auf Designmaßnahmen, die der Zerlegung in der EoL Behandlung von Produkten dienen, wird in der Norm nicht direkt eingegangen.

#### **Wiederverwendung**

Hersteller können und sollen Teile als wiederverwendbar kennzeichnen, solange zwei Voraussetzungen erfüllt sind:

- ▶ Es ist möglich, das Teil vom Produkt zu trennen, ohne dass die funktionale Integrität des Teils oder der Komponente vermindert wird. Dies schließt ein, dass das Produktdesign den Zugriff auf das Teil ermöglicht und dass Verschlussmechanismen reversibel zu öffnen sind.

---

<sup>38</sup> End-of-Life bezeichnet jegliche Behandlung nachdem ein Elektro(nik)produkt einer Einrichtung übergeben wurde, die im Bereich der Wiederaufbereitung, dem stofflichen Recycling, der energetischen Rückgewinnung und der Rückstandsentsorgung tätig ist. Siehe auch in IEC/TR 62635: 2012-10.

- Der Hersteller kann nachweisen, dass ein kommerzielles System zur Wiederaufarbeitung und Wiederverwendung etabliert ist. Dazu kann z.B. die Verfügbarkeit entsprechender aufgearbeiteter Teile auf dem Markt herangezogen werden.

## Recyclingfähigkeit

Die Norm liefert eine Berechnungsmethode für die Recyclingfähigkeit, welche als Anteil der recycelbaren Teile an einem Produkt in Prozent definiert ist:

$$R_{cyc} = \frac{\text{Gewicht der recycelbaren Teile eines Produkts}}{\text{Gesamtgewicht des Produkts}} * 100\%$$

Zudem wird auch die Verwertungsquote berechnet, die den Anteil der verwertbaren Teile an einem Produkt in Prozent wiedergibt:

$$R_{cov} = \frac{\text{Gewicht der verwertbaren Teile}}{\text{Gesamtgewicht des Produkts}} * 100\%$$

Zur Berechnung beider Aspekte müssen hinreichende Informationen über das Produkt sowie über die EoL Behandlungsschritte bekannt sein. Auf Produktseite müssen dazu die Produktkomponenten bzw. Teile hinsichtlich ihrer Masse und der eingesetzten Materialien bekannt sein. Dazu gehören auch Informationen, welche Teile im Zuge der Erstbehandlung separiert werden sollten (siehe Aspekt „Demontage“ oben) sowie in den verbleibenden Teilen die Masse an recyclingfähigen Materialien. Auf Seite der Behandlungsschritte müssen Recycling- und Verwertungsquoten bestimmt werden, um die Recycling- und Verwertungsquote zu berechnen. Dazu stellt die Norm beispielhaft Daten für zwei Szenarien zur Verfügung: Szenario 1 beschreibt die Entsorgung großer Haushaltsgeräte mit Daten der Korea Electronics Association (KEA). Szenario 2 beschreibt die Entsorgung von großen und kleinen Haushaltsgeräten, IT- und Telekommunikationsgeräten und Geräten der Unterhaltungselektronik mittels Daten europäischen Daten aus verschiedenen Quellen.

## Bezugnahme auf wirtschaftsstrategische Metalle und Kunststoffe

Wirtschaftsstrategische Metalle und Kunststoffe werden lediglich auf Bauteilebene adressiert. Hier werden im Rahmen der zwei o.g. Szenarien für Entsorgungswege materialbezogene Recycling- und Verwertungsquoten angegeben. Unter den gelisteten Materialien befinden sich auch einige Kunststoffe und wirtschaftsstrategische Metalle.

Die **Reparierbarkeit** und **Produktlebensdauer** werden von der Norm nicht gesondert adressiert.

## Bewertung

Die Methode zur Berechnung der Recyclingfähigkeit ist in erster Linie an Hersteller gerichtet, die diese Methode auf freiwilliger Basis durchführen und kommunizieren möchten. Hinsichtlich verbindlicher Mindestquoten mangelt es an repräsentativen öffentlichen Szenarien als Berechnungsgrundlage für die Recycling- und Verwertungsfähigkeit. (Ardente und Mathieux 2012) stellte in diesem Zusammenhang heraus, dass die Entwicklung von für die EU repräsentativen Daten zur Berechnung von Recycling- und Verwertungsfähigkeit konkreter Produkte das Potential hat, die IEC Methode robuster und für produktpolitische Instrumente anwendbar zu machen. Überarbeitungsbedarf wird auch hinsichtlich der Transparenz der im Anhang der Norm angegebenen Recycling- und Verwertungsquoten gesehen, da die Berechnungsgrundlagen und -methoden für die Daten nicht näher beschrieben sind. Hier könnte eine Vereinheitlichung der Bestimmung von materialbezogenen Recycling- bzw. Verwertungsquoten die Verlässlichkeit der Ergebnisse für die Recyclingfähigkeit/Verwertungsfähigkeit erhöhen.

**Norm: ONR 192102:2006-09 und ONR 192102:2014-08**

## ONR 192102: 2014 – Gütezeichen für langlebige, reparaturfreundlich konstruierte elektrische und elektronische Geräte

Die ON-Regel 192102 wurde im Jahre 2006 vom Komitee 157 „Abfallwirtschaft“ des Österreichischen Normungsinstituts gemeinsam mit Vertretern des Reparatur- und Service-Zentrum R.U.S.Z und des

Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft erarbeitet und durch eine aktualisierte Ausgabe im Jahr 2014 ersetzt. Die ON-Regel beinhaltet ein Nachhaltigkeitssiegel für langlebige und reparaturfreundlich konstruierte Elektro- und Elektronikgeräte (Produktbereich: Weiß<sup>39</sup>- und Braunware<sup>40</sup>). Um das Nachhaltigkeitssiegel für reparaturfreundlich konstruierte Elektro- und Elektronik-Geräte (Weiß- und Braunware) zu erhalten, wird das jeweilige Produkt anhand von definierten Kriterien, welche entweder als Muss-Bestimmung oder durch das Erreichen einer Mindestpunktzahl erfüllt werden können, überprüft. Die Kriterienlisten sind in Weißware- und Braunware-Produkte aufgeteilt und enthalten sowohl die zugrundeliegenden Motive/Prinzipien, als auch Umsetzungsbeispiele. Abhängig von der Höhe der erreichten Punktzahl des jeweiligen Kriteriums werden vom jeweiligen Prüfer Punktzahlen vergeben. Aus der insgesamt erreichten Punktzahl ergeben sich Qualitätsstufen zwischen 5 und 10, die einer Wertung von gut (5 und 6), sehr gut (7 und 8) oder ausgezeichnet (9 und 10) entsprechen. Anschließend wird ein Prüfbericht in Form einer tabellarischen Zusammenfassung der Prüfergebnisse erstellt. Bei Erfüllung aller Muss-Kriterien und einer Mindestanzahl von 30 Punkten bei den allgemeinen Kriterien und von mindestens 15 Punkten bei der Servicedokumentation wird dem Produkthersteller ein Prüfbericht überstellt, der ihm die Erfüllung der Anforderungen der ON-Regel bescheinigt.

Die Novellierung der Ausgabe ONR 192102:2006 führte zu geringfügigen Änderungen, wie z.B. einer Überarbeitung des Abschnitts 4 "Verfahren für den Nachweis der reparaturfreundlichen Konstruktion".

### **Anwendungsbereich**

Die ONR192102 bezieht sich auf Elektro- und Elektronikgeräte (EEG) – genauer Weißware und Braunware.

### **Reparierbarkeit**

Da die Norm ein Bewertungsverfahren für reparaturfreundlich konstruierte elektrische und elektronische Geräte beinhaltet, thematisiert sie den Aspekt Reparierbarkeit sehr stark.

### **Demontage**

Die Norm bewertet den Aspekt Reparierbarkeit auf Grundlage der Möglichkeit, Elektro(nik)geräte zu demontieren bzw. wieder zu montieren, somit spielt die Demontage eine dominierende Rolle bei der Bewertung.

### **Lebensdauer**

Die Norm beinhaltet mehrere Kriterien zur Lebensdauer mit dem Motiv der Sicherstellung der Langlebigkeit.

**Berechnung der Recyclingfähigkeit, Bezugnahme auf wirtschaftsstrategische Metalle und Kunststoffe** werden in der Norm nicht thematisiert.

### **Bewertung**

Die Norm enthält viele gute Ansätze und Aufforderungen zur Umsetzung von Maßnahmen für ökologisches Produktdesign. Ihren Schwerpunkt legt die Norm auf die Abfrage von reparaturfreundlichem Design. Es empfiehlt sich einzelne Aspekte der Norm genauer zu betrachten und nach Verwendungsmöglichkeiten in produktpolitischen Instrumenten wie der Ökodesign-RL oder der EU-Energieverbrauchskennzeichnung zu suchen. Das Abfragekonzept der Norm ist schlüssig und praktikabel.

---

<sup>39</sup> Weiße Ware umfasst Haushaltsgroßgeräte wie z.B. Kühlschränke, Waschmaschinen oder Geschirrspüler.

<sup>40</sup> Braune Ware umfasst Geräte der Unterhaltungselektronik wie z.B. Fernseher oder Radio.

## Norm: Richtlinienreihe VDI 2343

### Richtlinienreihe VDI 2343 – Recycling elektrischer und elektronischer Geräte

Der Verein Deutscher Ingenieure erstellt u.a. sogenannte Richtlinien, welche einem technischen Regelwerk/Leitfaden gleichen. Die fachliche Richtlinienarbeit wird von ehrenamtlich für den VDI tätigen Expertinnen und Experten geleistet. Die VDI 2343 „Recycling elektrischer und elektronischer Geräte“ ist eine von aktuell rund 2.000 VDI-Richtlinien. Ziel der Richtlinienreihe VDI 2343 ist es, praxistaugliche und rechtskonforme Handlungsempfehlungen für das Recycling elektrischer und elektronischer Geräte zu erarbeiten und der interessierten Öffentlichkeit zur Verfügung zu stellen. Die Richtlinien unterstützen alle betroffenen Kreise wie zum Beispiel Entsorger, öffentlich-rechtliche Entsorgungsträger, Hersteller, Verkäufer, Wiederverwendungseinrichtungen und Gesetzgeber in ihrer Arbeit.

Die Richtlinie teilt sich in sieben sogenannte Blätter auf.

Das **Blatt 1** „Grundlagen und Begriffe“ (Ausgabe Mai 2001) benennt die Ziele und Zielgruppen der Richtlinienreihe und erläutert die Fachbegriffe. Es gibt eine Übersicht über die rechtlichen Rahmenbedingungen des Recyclings elektrischer Geräte. Dabei legt es besonderes Gewicht auf die Produktverantwortung der Hersteller und erläutert ökonomische, ökologische und technische Bewertungsverfahren.

Das **Blatt 2** „Logistik“ (Ausgabe Februar 2010) stellt den betroffenen Kreisen, z.B. ÖRE, Systembetreiber, Handel und Hersteller sowie Betreiber von Behandlungsanlagen, Handlungsempfehlungen für die notwendigen Planungen und deren Realisierung bezüglich der Inhalte und Abläufe der Logistik zur Verfügung. Die Schaffung von Strukturen zur effizienten Erfassung von Elektro(nik)altgeräten, das Betreiben von Sammelstellen und/oder Übergabestellen sowie die Verbringung in Behandlungsanlagen sind logistische Herausforderungen, die unter ökonomischen und ökologischen Gesichtspunkten gesetzeskonform umzusetzen sind.

Die Verpflichtung der Hersteller zur Rücknahme von Elektro(nik)altgeräten und die damit einhergehenden Rücknahme- und Logistiksysteme werden durch das ElektroG geregelt. Unter der Voraussetzung § 10 Abs. 2 ElektroG, dass die Sammlung und Rücknahme von Altgeräten so durchzuführen ist, dass eine spätere Vorbereitung zur Wiederverwendung, Demontage und Verwertung nicht behindert werden, sieht das ElektroG grundsätzlich vier verschiedene Erfassungswege vor:

1. Rücknahme von Altgeräten aus privaten Haushalten über kommunale Übergabestellen und Übergabe an die Herstellersysteme gemäß § 14 Abs. 1 und 3 sowie § 15 Abs. 1 ElektroG II;
2. Rücknahme von Altgeräten aus privaten Haushalten über kommunale Übergabestellen und eigenständige Entsorgung durch den öffentlich-rechtlichen Entsorgungsträger gemäß § 14 Abs. 5 ElektroG II;
3. Rücknahme von Altgeräten aus privaten Haushalten über Vertreiber oder freiwillige Herstellerrücknahmesysteme gemäß § 16 Abs. 5 und § 17 Abs. 1, 3 und 5 ElektroG II;
4. Altgeräteentsorgung aus gewerblichen Bereichen gemäß § 10 Abs. 2 ElektroG II.

Das **Blatt 3** „Demontage“ (Ausgabe April 2009) enthält konkrete Handlungsanweisungen und Empfehlungen (z.B. Mindeststandards) für die Demontage von Elektro(nik)altgeräten, um Fehlinvestitionen seitens Erstbehandlern und Recyclingunternehmen zu vermeiden und neue Rationalisierungs- und Investitionspotenziale zu erschließen.

Das **Blatt 4** „Aufbereitung“ (Ausgabe Januar 2012) dient dazu Handlungsanweisungen und Empfehlungen für die Aufbereitung von Elektro(nik)altgeräten zu geben und berücksichtigt Vorgaben und Einflüsse wie den gesetzlichen Rahmen, Herstellervorgaben, Absatzmärkte für zurückgewonnene Stoffströme und die Art und Tiefe der Demontage. Die Aufbereitung umfasst im Wesentlichen das Zerkleinern, Klassifizieren und Sortieren in entsprechenden Anlagen. Die Zielsetzung liegt in der Abtrennung von Schad- und Störstoffen nach technischen und rechtlichen Vorgaben sowie die Herstellung von Stoffströmen zur Verwertung und schadlosen Beseitigung.

Das **Blatt 5** „Verwertung“ (Ausgabe November 2014) dient dazu Handlungsanweisungen und Empfehlungen für die stoffliche und energetische Verwertung von Elektro(nik)altgeräten im Sinne der aktuellen Rechtssituation zu geben. Die Handlungsanweisungen und Empfehlungen beziehen sich u.a. auf die in Elektro(nik)altgeräten enthaltenen Stofffraktionen. Als Stofffraktionen sind beispielsweise Metalle und Glas zu nennen.

Das **Blatt 6** „Vermarktung“ enthält Handlungsempfehlungen für die Vermarktung von Stoffen aus Elektro(nik)altgeräten. Volatile Märkte und sich schnell ändernde Rahmenbedingungen, zum Beispiel im Bereich von Abfallklassifizierungen und Transportvorschriften, stellen Herausforderungen für eine optimale Vermarktung dar. Zudem setzt in letzter Zeit eine Fokussierung auf "neue" Stoffe, wie z.B. Metalle der seltenen Erden ein, für die zum Teil erst noch neue Absatz- und Verarbeitungswege gefunden werden müssen.

Das **Blatt 7** „Re-use“ (Ausgabe Dezember 2014) dient dazu aufzeigen, dass mit dem Re-use von Produkten ein wirtschaftliches Potenzial erschlossen werden kann. Gleichzeitig kann durch eine sparsame Verwendung von natürlichen Ressourcen der Vorrat von Rohstoffen zur Herstellung von Produkten geschont und bei wiederholtem Einsatz von Produkten können zusätzlich Ressourcen gespart werden. Die Richtlinie behandelt vor allem rechtliche, technische und ökonomische Themenbereiche, wobei zusätzlich ökologische und soziale Aspekte berücksichtigt werden.

### **Anwendungsbereich**

VDI 2343 bezieht sich auf Elektro- und Elektronikgeräte (EEG). Der Fokus der Norm liegt verstärkt auf Elektro- und Elektronikaltgeräten und ihren Behandlungs- und Recyclingphasen.

### **Reparierbarkeit**

Die Norm beinhaltet ein Blatt 7 mit dem Namen „Re-use“, in welchem Reparierbarkeit explizit behandelt wird. Das Blatt sieht zwei Anwendungsbereiche vor. Zum einen „Re-use I“ (Wiederverwendung) und zum andern „Re-use II“ (Vorbereitung zur Wiederverwendung).

### **Demontage**

Die Norm geht auf Maßnahmen zur Demontage ein. Das Blatt 3 der Norm widmet sich ausführlich der Thematik.

### **Berechnung der Recyclingfähigkeit**

Die Norm geht auf Maßnahmen zur Recyclingfähigkeit ein. Einen Berechnungsansatz und bspw. Daten zum Einsetzen in eine Formel liefert die Norm nicht.

### **Wiederverwendung**

Die Norm geht auf Maßnahmen zur Wiederverwendung und Vorbereitung zur Wiederverwendung ein. Das Blatt 7 der Norm widmet sich ausführlich der Thematik „Re-use“.

### **Lebensdauer**

Die Norm geht an unterschiedlichen Stellen auf Fragestellungen zur Lebensdauer ein.

### **Bezugnahme auf wirtschaftsstrategische Metalle und Kunststoffe**

Die Norm thematisiert wirtschaftsstrategische Rohstoffe nicht explizit. Auf Kunststoffe im Recycling geht die Norm an diversen Stellen ein und behandelt dabei unterschiedliche Aspekte wie Problemlagen, Kunststoffunterschiede, Zusatzstoffe von Kunststoffen, Trennungs- und Separierungsmaßnahmen.

### **Bewertung**

Die Normenreihe hat einen stark informativen und erklärenden Charakter und geht intensiv auf die unterschiedlichen Phasen der Zweitnutzung und des zu Abfall werden von EEG ein. Sie entstand über mehr als ein Jahrzehnt und ist inzwischen an einigen Stellen nicht mehr ganz aktuell – als quasi „Lexikon“ des End-of-Life von EEG ist sie aber gut zu verwenden. Berechnungsmethoden oder Abfragen auf Produktgruppenebene enthält die Norm nicht.

## **Norm: Richtlinie VDI 2243**

### **VDI 2243 – Recyclingorientierte Produktentwicklung**

Die Norm 2243 des Vereins Deutscher Ingenieure ist ein technisches Regelwerk/Leitfaden aus dem Jahr 2002. Ziel dieser Richtlinie ist es, neben allen Produktverantwortlichen insbesondere dem Entwickler und dem Konstrukteur Informationen, Anleitungen und Entscheidungshilfen für die einzelnen Phasen der Produktentwicklung zu geben, um technische und wirtschaftliche Möglichkeiten sowie Alternativen zur Verbesserung der Recyclingfähigkeit von technischen Produkten erarbeiten und auswählen zu können. Auf gesellschaftliche, politische und soziale Umfeldbedingungen sowie auf die rechtlichen Vorgaben, die von entscheidender Bedeutung sein können, wird im Rahmen der VDI 2243 nicht näher eingegangen.

Die Richtlinie teilt sich in ein sogenanntes Blatt auf.

Die Richtlinie geht zu Beginn inhaltlich auf Zielkonflikte ein, die zwischen Recyclingfähigkeit, Ressourcenverbrauch und Emissionen bestehen können, zudem darauf, dass generelle Konflikte zwischen ökologischen Aspekten sowie markt- und kundenrelevanten technischen und wirtschaftlichen Anforderungen stehen. Im Anschluss handelt sie sehr schulbuchähnlich den Produktentstehungsprozess (PEP) ab. Laut Richtlinie gliedert sich der PEP in Strategieentwicklung, Vorentwicklung und Serienfertigung. Entscheidend für die recyclingorientierte Produktentwicklung sind laut Richtlinie die Zielfindungs- und Gestaltungsaufgaben, da hier die späteren Recyclingeigenschaften des Produkts definiert und maßgeblich beeinflusst werden. Eine Schlüsselrolle spielt die Entwicklung und Konstruktion. Daneben sieht die Richtlinie den Einkauf als wichtige Instanz an, der eine Schnittstelle zwischen Hersteller und Zulieferer darstellt und durch Anwendung recyclingorientierter Kriterien bei Einkaufsentscheidungen die Recyclingeigenschaften ebenfalls bestimmt.

Im darauffolgenden Abschnitt geht die Richtlinie konkreter auf die Recyclingfähigkeit ein und führt Kriterien auf wie ökologisch orientierte Materialauswahl, Demontagefähigkeit, Zugänglichkeit zu kritischen Komponenten, etc. Auch ist eine Gleichung dargestellt in Form eines Bruchs. Im Zähler sollen Kosten für Neuware + Beseitigungskosten in €/kg eingetragen werden, im Nenner die Recyclingkosten des Sekundärmaterials (Demontage [in Sekunden/€] + Aufarbeitung [in Sekunden/€] + Logistik [in €]). Als weitere Gestaltungsempfehlung beinhaltet die Richtlinie eine Grobcheckliste zur recyclingoptimierten Produktentwicklung. Die Grobcheckliste umfasst die technischen Recyclingkriterien: stoffliche Verwertbarkeit, Verwertungskompatibilität, Identifizierbarkeit, recyclingkritische Stoffe, Schad- u. Gefahrstoffe, Erkennbarkeit, Zugänglichkeit, Verbindungsarten, Vielfalt der Verbindungen, Demontagezeit, Recyclingprozesse. Des Weiteren listet die Richtlinie Praxis-Hinweise für die recyclingfreundliche Produktentwicklung auf und deutet deren Vorteile an. Zur Verdeutlichung führt die Richtlinie im Anschluss daran noch Anwendungsbeispiele im Bereich Unterbodenschutz für Pkw, Instrumententafel für Pkw, Heizungspumpensteuerung, Toaster, Ventilblockgestaltung für Waschgeräte u. Desktop-Computer. Die Richtlinie schließt ab mit zwei Praxisinstrumenten. Der Beschreibung eines Recyclingpasses, der dazu dienen soll hochwertiges Recycling komplexer Produkte in der End-of-Life Kette zu ermöglichen, da den Erstbehandlern recyclingrelevante Informationen zur Verfügung gestellt werden. Zum andern dem Internationalen Demontage-Informationssystem (IDIS), einem Softwaretool, das in mehrjährigen FuE-Projekten von Automobilherstellern entwickelt wurde, um die Bereitstellung eines einheitlichen Informationssystems für die Recycling- bzw. Verwertungsbranche zu ermöglichen.

### **Bewertung**

Die Richtlinie VDI 2243 ist eine kurz gefasste Richtlinie, um einen ersten Überblick für insbesondere Ingenieurinnen und Ingenieure, Produktdesigner, Einkäufer und sonstige Entscheidungsträger zu vermitteln, was recyclingorientierte Produktentwicklung bedeutet. Die Beschreibung des PEP hinsichtlich seiner umweltrelevanten Aspekte ist hilfreich, die Gleichung ein guter Ansatz, aber mit Schwächen in der Umsetzung. Es ist bezogen auf die für das Forschungsvorhaben ausgewählten Produktgruppen

schwer die einzusetzenden Zahlenwerte zu erheben, da in Deutschland insbesondere durch die geteilte Produktverantwortung (zwischen Staat u. Unternehmen) die Erfassung der Kosten für den Anwender der Gleichung nicht möglich ist. Insbesondere die Umweltkosten sind externalisiert, was das Ergebnis der Gleichung verfälscht. Die Grobcheckliste ist an sich nützlich, ihre stringente Durchführung im Detail aber nicht so einfach umsetzbar. Die Praxis-Hinweise bieten einen guten ersten Überblick was möglichst zu tun ist und was unterlassen werden sollte, um recyclingorientierte Produkte zu erhalten. Das Praxisinstrument Recyclingpass ist ein seit Jahren viel diskutiertes Thema. In der Vergangenheit hat es immer wieder Versuche zur Umsetzung gegeben, die aber in der täglichen Praxis der Erstbehandler nicht umsetzbar waren, da dort zum einen so schnell gearbeitet werden musste, das nur in sehr seltenen Fällen eine intensive Auseinandersetzung mit einem entsprechenden Recyclingpass erfolgte. Zum anderen beziehen sich die Recyclingpässe auf insbesondere manuelle Demontage, die Praxis zeigt aber sehr deutlich, dass inzwischen die überwiegende Anzahl der Elektro(nik)altprodukte bei der Erstbehandlung in den Shredder gelangen, womit umfassende Recyclingpassinformationen nutzlos sind. Das Beispiel IDIS-Softwarewerkzeug ist zwar an sich eine gute Sache, jedoch haben nur sehr wenige potenzielle Nutzer Zugriff, zudem nur in der Automobilindustrie und ihrer Wertungskette, was sie für unsere Produktgruppen nutzlos macht. Die Haushaltsgeräte-, Informations- u. Kommunikationselektronikbranche hat ein vergleichbares Werkzeug bisher nicht erschaffen. Ob dies bei der wesentlich größeren Anzahl von Produkten am Markt und Stakeholdern zum einen möglich wäre, zum anderen wie sinnvoll solch eine Informationsbereitstellung ist, hängt sehr von der Umsetzung und Praxistauglichkeit ab. Um qualitativ hochwertiges Recycling durchzuführen ist ein Mehr an Informationen sicherlich erforderlich, der einfache Transport von Informationen zum Nutzer, der daraus einen Mehrwert für hochwertiges Recycling generiert, bleibt aber eines der größten Probleme, ein nur wenigen Personen(-gruppen) zugängliches Softwareinstrument hilft letztlich nicht.

#### **Norm: IEEE 1874**

#### **IEEE 1874: 2013 - Standard for Documentation Schema for Repair and Assembly of Electronic Devices**

Der IEEE 1874 "Standard for Documentation – Schema for Repair and Assembly of Electronic Devices" ist ein vom IEEE (Institute of Electrical and Electronic Engineers) veröffentlichter Standard. Das „oManual" (open Manual) ist ein Standard für die Speicherung und Weitergabe von Verfahrensanweisungen. Das oManual Datenformat kann sowohl als offline Datei-Paket als auch online genutzt werden. Das Format kann z.B. für die Dokumentation und Beschreibung von Reparaturarbeiten und Montage von elektronischen Geräten oder auch für jede Art von Arbeitsanleitungen verwendet werden. Der Standard beschreibt das oManual Datenmodell, den Webservice API<sup>41</sup> und das Bundle-Datei Format<sup>42</sup>.

#### **Bewertung**

Da der Standard ein Schema zur Dokumentation von Verfahrensanweisungen für die Reparatur und Montage/Demontage von elektronischen Geräten beschreibt, ist er anhand der gewählten Kriterien kaum bewertbar. Jedoch stellt die Norm eine Möglichkeit zur Vereinfachung und Vereinheitlichung von Reparatur- und Montage-/Demontageanleitungen dar und ist somit dennoch von Bedeutung für das Forschungsvorhaben.

---

<sup>41</sup> API ist ein Akronym für „application programming interface“ (englisch für Schnittstelle zur Anwendungsprogrammierung)

<sup>42</sup> BUNDLE ist eine Dateieindung, die von der Firma Apple, Inc. für die Bedürfnisse ihrer Urhebersoftware erschaffen wurde.

## Norm: PAS 1049:2004-12

### **PAS 1049: 2004 – Übermittlung recyclingrelevanter Produktinformationen zwischen Herstellern und Recyclingunternehmen - Der Recyclingpass**

Die Norm PAS 1049 „Übermittlung recyclingrelevanter Produktinformationen zwischen Herstellern und Recyclingunternehmen – Der Recyclingpass“ erläutert die Bereitstellung recyclingrelevanter Informationen in Form eines Recyclingpasses. Es werden der Informationsgehalt für ein fachgerechtes Recycling definiert sowie Aufbau und Struktur für einen Recyclingpass vorgeschlagen. Hersteller von Elektro(nik)geräten haben damit eine Grundlage um standardisierte Produktinformationen für die Recyclingunternehmen zur Verfügung zu stellen. Recyclingrelevante Informationen sind u.a. Stofflisten, Skizzen und Hinweise auf separat zu behandelnde Produktkomponenten. Das Informationsmanagement der WEEE Richtlinie (2012/19/EU) wird mit dem Recyclingpass erfüllt und damit verbunden kann die Effizienz beim Recycling erhöht werden. Zur Übermittlung der produktbezogenen Daten wird eine zentrale Datenbank vorgeschlagen, in welche die Hersteller ihre Daten in Form von Recyclingpässen ablegen und Recyclingunternehmen diese gezielt abrufen können.

Zur Bestimmung der Materialzusammensetzung werden „Umbrella Specifications“ für Produktfamilien elektronischer Bauelemente festgelegt. Diese bieten Materialdeklarationen an, sprich typische Materialverteilungen der Produktfamilie im prozentualen Verhältnis. Weiterhin wird eine Probezerlegung von Produkten empfohlen mit anschließender chemischer Analyse.

#### **Anwendungsbereich**

Der Anwendungsbereich der Norm sind explizit Elektro(nik)geräte.

#### **Demontage**

Anleitungen zur Demontage sind im Recyclingpass ausführlich vorgesehen z.B. in Form von Explosionszeichnungen und Angaben zur Demontage für einzelne Komponenten. Ein Farbcode hilft dabei, Stoffe und Komponenten zu erkennen, die:

- ▶ entnommen und separat behandelt werden müssen,
- ▶ den Recyclingprozess stören können und
- ▶ Erlöse erzielen können.

In dieser Kategorisierung haben die ersten beiden Punkte Vorrang, wobei grundsätzlich auch eine Zuordnung zu mehreren Kategorien möglich ist.

**Reparierbarkeit** wird nicht bearbeitet, da es vorrangig um die Verwertung von Altgeräten geht (Rohstoffrückgewinnung). Auf die **Berechnung der Recyclingfähigkeit** wird in der Norm kein Bezug genommen.

Die **Wiederverwendung** von Produkten und Komponenten ist nicht das Ziel des Recyclingpasses. **Lebensdauer, Bezugnahme auf wirtschaftsstrategische Metalle und Kunststoffe** werden von der Norm ebenfalls nicht gesondert adressiert.

#### **Bewertung**

Die Norm PAS 1049 hat einen einheitlichen Informationsfluss vom Gerätehersteller zum Recyclingunternehmen zum Ziel. Damit sind Parallelen zur Vorgehensweise nach IEC/TR 62635 erkennbar, wobei letztere ebenso den Informationsfluss vom Recyclingunternehmen zum Hersteller behandelt. Die Norm verfolgt die Maßgabe, nur solche Informationen über Geräte abzufragen, die dem Recyclingunternehmen einen realen Mehrwert bieten, um so den verbundenen Arbeitsaufwand zu minimieren und die Anwendbarkeit und Praktikabilität sicherzustellen. Des Weiteren sind Hinweise für Hersteller enthalten, aus welchen Quellen die benötigten Informationen beschafft werden können. In diesem Kontext wird auch das Tool ProdTect (Tool for Product Architects) genannt, das u.a. eine automatische Generierung des Recyclingpasses ermöglichen soll.

In der Praxis kann es für die Hersteller problematisch sein, Akteure ihrer Zulieferkette in die Beschaffung der benötigten Daten (insbesondere Materialzusammensetzung) einzubinden.

Anmerkung: die vorgestellte Plattform RecyclingPass®, welche unter [www.recyclingpass.net](http://www.recyclingpass.net) abrufbar war, ist nicht mehr erreichbar. Sie wurde innerhalb des Stream-Projektes entwickelt und sollte als überbetriebliche Plattform Recyclingpässe zwischen Herstellern und Recyclingunternehmen übermitteln. Ebenso ist die Webseite von ProdTect, das in einem Projekt der TU Braunschweig erstellt wurde, nicht mehr erreichbar.

#### **Norm: BS 8887:1**

#### **BS 8887-1: 2006 – Design for manufacture, assembly, disassembly and end-of-life processing (MADE) – Part 1: General concepts, process and**

Der Reihe von Normen des British Standard BS 8887 liegt die Erkenntnis zu Grunde, dass i.d.R. der größte Anteil der Umweltwirkungen von Produkten über den Lebenszyklus in der Designphase auftritt. Die Norm BS 8887-1:2006 „Design for manufacture, assembly, disassembly and end-of-life processing (MADE) – Part 1: General concepts, process and requirements“ ist die erste veröffentlichte Norm aus der BS 8887 Reihe. Sie legt Anforderungen an Vorbereitung, Inhalt und Struktur zum Output von Designprozessen sowie technische Dokumentation für Produkte dar.

Die Norm richtet sich in erster Linie an Produktdesigner und dient als genereller Leitfaden für den Designprozess. Darüber hinaus werden aber auch umweltrelevante Aspekte zum End-of-Life adressiert. So wird empfohlen, die Methodik der Ökobilanz anzuwenden, um Erkenntnisse zu Umweltwirkungen der einzelnen Lebenszyklusphasen eines Produktes zu erlangen. Des Weiteren werden Empfehlungen ausgesprochen, die die Demontage und Recyclingfähigkeit eines Produktes betreffen.

Materialien und/oder Komponenten sollen möglichst den folgenden Kriterien entsprechen (Auszug):

- ▶ Reichlich im Vorkommen
- ▶ Möglichst lokal
- ▶ Geringer Energieverbrauch in der Bereitstellung
- ▶ Erneuerbare Materialien
- ▶ Recycelte Materialien/Komponenten
- ▶ Vermeidung pigmentierter Kunststoffe

#### **Anwendungsbereich**

Der Anwendungsbereich von BS 8887:1 ist nicht eingeschränkt und liegt daher auf sowohl Energieverbrauchsrelevanten als auch auf Nicht-Energie-verbrauchsrelevanten Produkten.

#### **Reparierbarkeit**

Die Reparierbarkeit wird nicht direkt adressiert, jedoch implizit durch die Vorgaben zum Produktdesign tangiert, insbesondere in den Empfehlungen zum Demontageprozess (Anhang C.5). So wird empfohlen, sich auf wenige und einheitliche Verbindungselemente zu beschränken sowie einen einfachen Zugang zu wertvollen und wiederverwendbaren Komponenten zu ermöglichen. Des Weiteren sollen Ersatzteile eindeutig identifiziert werden.

#### **Demontage**

Anforderungen an das Design von Produkten, welche den Demontageprozess erleichtern bzw. die Umweltwirkungen von Demontage- und Recyclingprozessen minimieren sollen, sind in Anhang C.5 (Demanufacturing processes) in der Form einer Checkliste aufgelistet.

#### **Recyclingfähigkeit**

Siehe Reparierbarkeit, Demontage und Bezugnahme auf Kunststoffe.

#### **Wiederverwendung**

Die Empfehlungen zum Demontageprozess (Anhang C.5) haben Implikationen für die Wiederverwendung von Komponenten oder Produktteilen. Explizit findet die Wiederverwendung nur untergeordnet Erwähnung.

### **Lebensdauer**

Aspekte der Lebensdauer finden am Rande Erwähnung und werden nicht in einem dezidierten Kapitel behandelt

### **Bezugnahme auf wirtschaftsstrategische Metalle und Kunststoffe**

Wirtschaftsstrategische Metalle werden nicht thematisiert, jedoch inhaltlich tangiert. Beispielsweise sollen Materialien ausgewählt werden, die „reichlich vorkommen“, sprich: geringes Verfügbarkeitsrisiko. In der Auflistung von Materialaspekten, welche im Designprozess beachtet werden sollen, werden u.a. Kunststoffe genannt. Dabei geht es z.B. darum, das Vermischen von Materialien zu vermeiden, die sich gegenseitig negativ beeinflussen oder die Recyclingeffizienz vermindern. So wird empfohlen, auf pigmentierte Kunststoffe zu verzichten um Recyclingprozesse zu vereinfachen.

### **Bewertung**

Die Norm BS 8887:1 ist als Leitfaden für die Designphase von Produkten gedacht, die sich auch auf die End-of-Life Phase bezieht. Die meisten Kriterien werden tangiert, jedoch bleibt es bei Empfehlungen auf einer Ebene, die keine Antworten auf Detailfragen liefert. So wird zwar empfohlen, keine Materialien zu verwenden, die die Recyclingprozesse negativ beeinflussen können, jedoch werden dazu keine konkreten Beispiele oder Verweise auf Nachschlagewerke gegeben. Die Anwendbarkeit und Praktikabilität der Norm wird somit, im Hinblick auf die Fragestellungen des Forschungsvorhabens, als gering eingeschätzt.

### **Norm: DIN CEN/TS 16524:2013-12 (D)**

#### **DIN CEN/TS 16524: 2013-12 (D) – Mechanische Produkte - Methodik zur Verminderung der Umweltauswirkungen bei Produktgestaltung und Entwicklung**

Die Norm trägt den Titel: „Mechanische Produkte – Methodik zur Verminderung der Umweltauswirkungen bei Produktgestaltung und Entwicklung“. Die Norm beschreibt eine Methodik zur Verminderung der Umweltauswirkungen bei Produktgestaltung und Entwicklung mechanischer Produkte. Darunter fallen Produkte, die industriell hergestellt werden, z.B. maschinelle Anlagen, Fertigungssysteme, Komponenten, Werkzeuge, Haushaltsgegenstände, optische Bauteile und Messgeräte. EEG können demzufolge ebenfalls darunterfallen. In der vorgestellten Methodik wird in aufeinanderfolgenden Schritten ein Referenzprodukt festgelegt und bewertet, Gestaltungsvarianten sowie Designvarianten und Umweltaspekte ausgewählt, beurteilt und abschließend zukünftige Aktivitäten festgelegt. Anhand **konkreter Fragebögen**, Entscheidungsalgorithmen und Berechnungsformeln wird dem Anwender die Umsetzung der vorgeschlagenen Methode erleichtert. Dabei wird auf bekannte Rechnungsmethoden zurückgegriffen und gleichzeitig erfolgt eine Abgrenzung zu bestehenden Standards wie einer vollständigen Ökobilanz nach ISO 14040, dem ökologischen Fußabdruck und der Umsetzung der Richtlinie 2009/125/EG (umweltgerechte Gestaltung energieverbrauchsrelevanter Produkte). Die Norm ist als Verbindungsstück zwischen der Verbesserung der Umweltleistung eines Produktes und der Kommunikation dieser zu verstehen. Sie stellt vor allem für KMUs einen pragmatischen Ansatz dar, um Umweltaspekte in der Produktgestaltung zu berücksichtigen.

### **Anwendungsbereich**

Der Anwendungsbereich von DIN CEN/TS 16524 bezieht sich auf mechanische Produkte und damit sowohl auf energieverbrauchsrelevante einschließlich EEG als auch auf nicht-energieverbrauchsrelevante Produkte.

### **Reparierbarkeit**

Die Reparierbarkeit wird in den Gestaltungsvarianten aufgegriffen unter der Strategie „Optimierung der Produktlebensdauer“. Aufgeführte Beispiele sind:

- ▶ Anteil der tatsächlich reparierten Produkte
- ▶ Zeitraum zwischen zwei Instandhaltungsvorgängen
- ▶ Zeitdauer bei Reparaturen
- ▶ Kosten für Instandhaltung und Reparatur über die gesamte Lebensdauer jedes Produkts
- ▶ Weiterentwicklung der modularen Struktur und deren Anpassungsfähigkeit: Anzahl, Masseanteil in Prozent der untereinander austauschbaren Module je Produkt

### **Demontage und Recyclingfähigkeit**

Demontage und Recyclingfähigkeit werden in den zwei Strategien „Verbesserung der Recyclingfähigkeit (und der Verwertbarkeit) am Lebensende“ und „Verwendung vorhandener Entsorgungssysteme“ (durch Informierung des Endverbrauchers) aufgeführt.

Gestaltungsvarianten und Umweltaspekte werden unter dem Punkt Durchführung erläutert:

„Die erforderlichen Verfahren zur Beschreibung der DO<sup>43</sup>- und EA<sup>44</sup>-Indikatoren sind festzulegen, z. B.:

- ▶ Messung oder Prüfverfahren (unter Angabe der genutzten Norm oder des technischen Dokuments);
- ▶ Gleichung für die Berechnung;
- ▶ Berechnungsverfahren (unter Angabe der genutzten Norm oder des technischen Dokuments und der gegebenenfalls speziellen Anwendungsbedingungen).

Es ist sicherzustellen, dass die Verfahren in Bezug auf die DO- und EA-Indikatoren für das Projekt geeignet sind und einsatzbereit sind.“

Möchte der Hersteller eine Umweltaussage nach ISO 14021 für das relevante Produkt herausgeben, so ist er verpflichtet neben den Änderungen (Gestaltungsvarianten und Umweltaspekte nach Neugestaltung des Produktes) auch die verwendeten Verfahren anzugeben, die zur Berechnung und zum Messen der Indikatoren verwendet wurden.

### **Wiederverwendung**

Bei der Wiederverwendung übernimmt die vorliegende Norm die Definition der ISO 22628:2002, 3.6: „Möglichkeit bei Bauteilen, aus dem Abfallmaterialfluss einer Wiederverwendung zugeführt zu werden“. Im Fragebogen für anwendende Unternehmen wird nach Komponenten oder Unterbaugruppen gefragt, die am Produktlebensende wiederverwendet werden können. Auch die Wiederverwendbarkeit der Verpackung wird abgefragt. Ein Beispiel für eine Gestaltungsvariante bzw. der dazugehörige Indikator ist das Verhältnis der Anzahl der wiederverwendbaren Bauteile gegenüber der Gesamtanzahl der Bauteile. Auch die Häufigkeit der Wiederverwendung von Verpackungen kann z.B. als Indikator genutzt werden.

### **Lebensdauer**

Die Lebensdauer von Produkten und Bauteilen wird in der vorliegenden Norm wiederholt angesprochen. Tabelle E.1 der Norm führt 21 Grundsätze und die verbundenen Kriterien und Schwellenwerte aus. Die Lebensdauer wird dabei in zwei Punkten genannt. In den Fragebögen wird passend für Bestandteile einer größeren Baueinheit abgefragt, wie groß die Lebensdauer im Vergleich zu derjenigen der Baueinheit ist. Auch die gesamte Lebensdauer eines Produktes wird abgefragt (Antwort in Jahren oder X Produktzyklen).

Die Optimierung der Produktlebensdauer ist mit mehreren Gestaltungsvarianten und Indikatoren ausgeführt:

---

<sup>43</sup> Gestaltungsvariante (en: Design Option)

<sup>44</sup> Umweltaspekt (en: Environmental Aspect)

Tabelle 24: Auszug aus Tabelle C.1 — Gestaltungsvarianten und DO-Indikatoren (Seite 36, DIN CEN/TS 16524:2013-12)

Strategie	Beispiel für Gestaltungsvarianten	Beispiel für DO-Indikatoren
Optimierung der Produktlebensdauer	Verbesserung der Haltbarkeit und der Zuverlässigkeit des Produkts (QB5 – QB7)	geplante Lebensdauer des Produkts tatsächliche Lebensdauer des Produkts
	Ermöglichung von Instandhaltung und Reparatur des Produkts (QC8)	Anteil der tatsächlich reparierten Produkte Zeitraum zwischen zwei Instandhaltungsvorgängen Zeitdauer bei Reparaturen Kosten für Instandhaltung und Reparatur über die gesamte Lebensdauer jedes Produkts
	Weiterentwicklung der modularen Struktur und deren Anpassungsfähigkeit	Anzahl, Masseanteil in Prozent der untereinander austauschbaren Module je Produkt
	Verkleinerung der Außenmaße des Produkts	gesamtes Produktaufkommen
	Stärkung des Produkts – Bezug zum Nutzer	Grad der Nutzerzufriedenheit Indikator für die Wahrnehmung von Qualität aus Nutzersicht

### Bezugnahme auf wirtschaftsstrategische Metalle und Kunststoffe

Wirtschaftsstrategische Rohstoffe werden nicht thematisiert. Kritikalität wird in der Norm nicht adressiert: „Die Fertigung umfasst die Werkstoffbearbeitung und -veredelung sowie den Zusammenbau von Produkten und Komponenten. Die Förderung von Rohstoffen oder die Herstellung von Ausgangsstoffen werden dabei nicht berücksichtigt.“ (Seite 23, Fußnote d).

Kunststoffe werden nur indirekt angesprochen, ihre Recyclingfähigkeit wird mit  $r=0$  angegeben, da sie zwar theoretisch recycelbar sind, in der Praxis jedoch nahezu immer verloren gehen (kein Recyclingsystem vorhanden). Weiterhin wird in den Fragebögen unter dem Punkt „gefährliche Stoffe“ auf potentiell enthaltene Flammenschutzmittel in Kunststoffen hingewiesen.

### Bewertung

Die Norm enthält viele relevante Aspekte für ökologisches Produktdesign. Auch die enthaltenen Berechnungsmethoden sollten einer weiteren Betrachtung und Anwendung unterzogen werden. Für bspw. die Quote der Recyclingfähigkeit (S. 25) ergeben sich in der Praxis zwar noch Schwierigkeiten, da der Hersteller u.a. keine Kenntnis darüber hat (oder in Erfahrung bringen kann), wie hoch für einzelne Bauteile (Spulen, Kondensatoren, Leiterplatten, etc.) Recyclingquoten sind.

Ähnlich der Norm ONR192102 enthält die DIN CEN/TS 16524 viele Abfrageelemente. Dabei erfragt die Norm auch Produktsystemaspekte ab, bis hin zu Unternehmensstrukturen. Ob bspw. das betreffende Unternehmen so aufgestellt ist, dass es Komponenten oder Baugruppen aus zurückkommenden Produkten wiederverwerten kann. Die System- und Unternehmensfragen gehen folglich über eine Produktadressierung hinaus. Sicherlich ist der eher ganzheitliche Ansatz zielführend, inwieweit er auf produktpolitische Instrumente übertragbar ist, sollte geprüft werden.

**Norm: DIN EN 62430:2010-02; VDE 0042-2:2010-02**

**DIN EN 62430: 2010; VDE 0042-2: 2010 – Umweltbewusstes Gestalten von elektrischen und elektronischen Produkten**

Die internationale Norm 62430 legt Anforderungen und Verfahren fest zur Integration von Umweltaspekten in Gestaltungs- und Entwicklungsprozessen von elektrischen und elektronischen Produkten und Systemen. Dafür werden die Grundlagen des umweltbewussten Gestaltens (**Environmentally Conscious Design**) beschrieben und darauf aufbauend der Prozess zur Umsetzung. Die Norm erläutert die Grundlagen des Lebenszyklusdenkens ohne dabei konkret einzelne Umweltaspekte tiefer zu behandeln. So wird die Möglichkeit zur Wiederverwendung, Recycling oder Verwertung zwar als potentieller Umweltaspekt im Anhang erwähnt, dient jedoch nur als Beispiel zur Identifikation signifikanter Lebenswegabschnitte und Umweltaspekte.

**Anwendungsbereich**

Die DIN EN 62430 bezieht sich auf Design und Gestaltung von Elektro- und Elektronikgeräten (EEG).

Die Kriterien **Reparierbarkeit, Demontage, Recyclingfähigkeit, Wiederverwendung, Lebensdauer** sowie **Bezugnahme auf wirtschaftsstrategische Metalle und Kunststoffe** werden in der Norm nicht oder nur am Rande thematisiert.

**Bewertung**

Der Mehrwert der Norm für das Projekt wird als gering eingestuft. Innovative Aspekte enthält die Norm nicht, sie ist eher lehrbuchartig verfasst. Eine weitere Behandlung der Norm ist daher nicht vorgesehen.

**Norm: DIN EN ISO 14006**

**DIN EN ISO 14006: 2011 – Umweltmanagementsysteme - Leitlinien zur Berücksichtigung umweltverträglicher Produktgestaltung**

Die vorliegende Norm „Umweltmanagementsysteme – Leitlinien zur Berücksichtigung umweltverträglicher Produktgestaltung“ verbindet die Wissensbereiche, die für umweltverträgliche Produktgestaltung innerhalb eines Umweltmanagementsystems (UMS) erforderlich sind. Folgende Normen werden genutzt und zueinander in Beziehung gesetzt:

- ▶ ISO/TR 14062
- ▶ IEC 62430
- ▶ ISO 9001
- ▶ ISO 14001

Die Norm richtet sich vorrangig an Organisationen, die über ein UMS gemäß ISO 14001 verfügen. Sie schafft nicht von sich aus spezielle, umweltbezogene Leistungskriterien.

Die Aspekte Reparierbarkeit, Demontage, Berechnung der Recyclingfähigkeit, Wiederverwendung, Lebensdauer und Kritikalität werden nicht behandelt. Anknüpfungspunkte zu strategischen Metallen und Kunststoffen sind damit ebenfalls nicht gegeben. Umweltaspekte auf Produktebene werden indirekt angesprochen:

*„a) Bestimmung der Umweltaspekte, bezogen auf den gesamten Produktlebensweg, die durch die Organisation überwacht und beeinflusst werden können.*

*Für jede Phase des Lebensweges sollte die Organisation Umweltaspekte bestimmen, sowohl Inputs (Materialverbrauch, Energie, Wasser und andere genutzte Ressourcen) als auch Outputs (Abfall, Emissionen und andere), aus denen sich Umweltauswirkungen (z.B. Verschmutzung von Luft, Wasser und Boden, Klimawandel) ergeben.*

*b) Bewertung der Umweltaspekte, um deren Bedeutsamkeit zu ermitteln.*

*Um zu bestimmen, welche Aspekte bedeutsam sind, sollte die Organisation eine hauptsächlich nach Umweltkriterien ausgerichtete Verfahrensweise einführen, die so viele Arten von Umweltauswirkungen wie möglich berücksichtigt. Die Ergebnisse der Bewertung sollten wiederholbar und nachvollziehbar sein.*

*Bei der Gestaltung oder Nachgestaltung eines Produktes darf die Bewertung der Wichtigkeit seiner Umweltaspekte auf der Grundlage eines am Markt verfügbaren Vorgängermodells des Produktes, eines gleichartigen Produktes oder anhand einer hypothetischen Referenz vorgenommen werden.“*

(DIN EN ISO 14006, Kapitel 5.3.1, Seite 22)

## **Bewertung**

Der Mehrwert der Norm für das Projekt wird als eher gering eingestuft. Innovative Aspekte enthält die Norm nicht, sie fokussiert auf Management im Unternehmen. Eine weitere Behandlung der Norm ist daher nicht vorgesehen.

## **Fachbericht: ISO/TR 14062: 2002**

### **ISO/TR 14062: 2002 – Umweltmanagement - Integration von Umweltaspekten in Produktdesign und -entwicklung**

Der Fachbericht ISO/TR 14062 beschreibt Konzeptionen und Praxis für die Integration von Umweltaspekten bei Design und Entwicklung von Produkten. Produkte schließen hierbei explizit auch Dienstleistungen ein. Die Norm behandelt vor allem Fragen des Managements, weniger die konkrete Umsetzung auf Produktebene. Das Kapitel 7 „Produktbezogene Strategien“ gibt folglich nur einen Überblick über mögliche Umweltaspekte, welche über den Lebensweg zu Umweltauswirkungen führen können. Das Konzept des Lebenszyklusdenkens wird erläutert sowie auf die Subjektivität von Bewertungen hingewiesen. Der beschriebene Ansatz enthält die Grundzüge einer LCA.

### **Anwendungsbereich**

Die DIN ISO/TR 14062 bezieht sich auf Umweltmanagementaspekt in Produktdesign und -entwicklung.

### **Reparierbarkeit**

Reparierbarkeit wird nur einmal am Rande erwähnt unter 7.5. Designstrategien: „Design für lange Lebensdauer: Design für lange Lebensdauer: Berücksichtigung der Langlebigkeit des Produkts, seiner Reparaturfähigkeit und Wartungsfähigkeit“.

### **Demontage**

Ähnlich werden Ansätze für eine leichte Demontage vereinzelt als Beispiel erwähnt.

### **Recyclingfähigkeit**

Recycling wird zwar mehrfach genannt, jedoch ist kein Ansatz zur Berechnung der Recyclingfähigkeit vorhanden.

### **Wiederverwendung**

Wiederverwendung wird im Fachbericht vereinzelt erwähnt, jedoch nicht tiefergehend thematisiert.

### **Lebensdauer**

Die Lebensdauer wird im Fachbericht wiederholt erwähnt; sowohl um das Lebenszyklusdenken anzusprechen, als auch das Zusammenspiel von Nutzungsdauer und Lebensdauer sowie etwaiger Wiederverwendung.

### **Bezugnahme auf wirtschaftsstrategische Metalle und Kunststoffe**

Wirtschaftsstrategische Rohstoffe und Kunststoffe werden nicht thematisiert.

## **Bewertung**

Der Mehrwert der Norm für das Projekt wird als eher gering eingestuft. Innovative Aspekte enthält die Norm nicht, sie fokussiert auf Management im Unternehmen. Eine weitere Behandlung der Norm ist daher nicht vorgesehen.

### **Anleitung: iFixit Repairability Scorecard**

#### **iFixit Repairability Scorecard**

iFixit ist ein Unternehmen, welches es sich insbesondere zur Aufgabe gemacht hat Reparaturanleitungen für unterschiedlichste Produkte, meist Elektro(nik)geräte, in seiner Onlinedatenbank zusammenzutragen. Diese Reparaturanleitungen werden zum einen von iFixit und zum anderen von Benutzerinnen und Benutzern der Website erstellt.

Um die Reparierbarkeit von u.a. Smartphones, Tablets und Computern vergleichbar zu machen, entwickelte das Unternehmen die „iFixit-Scorecard“. Der „Score“ ist das Ergebnis der Bewertung der Reparatur des Gerätes nach 15 Kriterien, bei welcher insgesamt 100 Punkte erreicht werden können<sup>45</sup>. Nach Abschluss des Bewertungsvorganges wird die Punktzahl durch zehn geteilt, auf ganze Zahlen gerundet und mit den Ergebnissen anderer Geräte desselben Typs auf der „iFixit-Scorecard“ zusammengefasst.

Bei der Bewertung der Reparatur erfolgt die Punktevergabe anhand der Kriterien nach dem „Alles-oder-Nichts-Prinzip“, das heißt, ist das Kriterium nicht erfüllt, gibt es keine Punkte – gilt das Kriterium als erfüllt, gibt es die volle Punktzahl. Für fünf der 15 Kriterien gibt es jeweils 10 Punkte. Diese 10-Punkte-Kriterien sind bspw. eine verfügbare Reparaturanleitung, eine leicht entnehmbare Batterie, die Verwendung handelsüblicher Schrauben oder auch reversible Befestigungen.

Für die anderen zehn Kriterien gibt es jeweils 5 Punkte. Beispielsweise für die Verwendung von weniger als drei Schraubentypen, eine sparsame Verwendung von Klebstoffen zur Verbindungsherstellung im Gerät, die Reparierbarkeit innerhalb einer halben Stunde bei Smartphones und Tablets bzw. einer Stunde bei Computern.

Die Punktevergabe lässt sich nicht in allen Einzelheiten nachvollziehen, da u.a. auf der Scorecard lediglich die drei wichtigsten Kriterien des Geräts angegeben werden, wodurch die Nachvollziehbarkeit der Bewertung schwerfällt.

Auch ist das Erreichen einiger Kriterien recht subjektiv, da bspw. die übermäßige Verwendung von Klebstoffen nicht direkt miteinander vergleichbar ist und somit immer von der Empfindung des Reparateurs abhängt. Insgesamt bietet die „iFixit Scorecard“ einen guten und übersichtlichen Vergleich zwischen den Geräten, da die Bewertungen nach praxisnahen und einschlägigen Kriterien durchgeführt werden.

In der Regel enthalten die Reparaturanleitungen von iFixit Angaben dazu, welche Werkzeuge benötigt werden.

#### **Anwendungsbereich**

Mit Stand Oktober 2015 bewertet iFixit die Produktkategorien „Smartphone/Tablet“ und „Computer“ mittels zwei Sätzen von produktgruppenspezifischen Kriterien. Eingeschlossen in die Kategorie „Computer“ sind auch Notebooks und „all-in-one“ PCs.

#### **Reparierbarkeit**

Da die Norm ein Bewertungsverfahren für die theoretische Reparierbarkeit von Elektronikgeräten bietet, ist sie eindeutig unter Reparierbarkeit einzuordnen. Anhand des Kriterienkataloges lässt sich einsehen, welche Designoptionen als besonders positiv oder negativ herausgestellt werden.

---

<sup>45</sup> Auflistung aller Kriterien auf der Webseite von iFixit unter <https://www.ifixit.com/Info/Repairability>

## Demontage

Die Norm bewertet die Reparierbarkeit auf Grundlage der Möglichkeit, Elektronikgeräte zu demontieren bzw. wieder zu montieren, somit spielt die Demontage eine dominierende Rolle bei der Bewertung. So stehen auf der Webseite von iFixit neben den o.g. Reparaturanleitungen auch Demontageanleitungen für Produkte zur Verfügung. Bei Elektronikprodukten endet die Demontage zumeist mit der Separierung aller Komponenten, inkl. der Leiterplatte.

## Produktlebensdauer

Die Produktlebensdauer findet sich als Kriterium in der Scorecard nicht explizit wieder. Dennoch wird Produkten teilweise eine „robuste Bauweise“ als positives Merkmal herausgestellt, welches die Produktlebensdauer potentiell erhöht.

Die iFixit Scorecard beschränkt sich auf die Bewertung der Reparierbarkeit von Elektronikgeräten. Auf **Recyclingfähigkeit, Wiederverwendung** sowie **Kunststoffe und wirtschaftsstrategische Metalle** wird kein direkter Bezug genommen.

## Bewertung

Die iFixit Scorecard ist ein durchaus praktikabler Ansatz, um Konsumentinnen und Konsumenten darüber zu informieren, wie gut ein Gerät reparierbar ist. Sie beruht auf der Vergabe von Punkten für das Erfüllen produktgruppenspezifischer Kriterien, ist jedoch keine objektiv-quantitative Methode, da das Erfüllen bzw. nicht-Erfüllen der Kriterien oftmals von der Empfindung der jeweils bewertenden Person abhängt.

Die bebilderte Anleitung ist in Arbeitsschritte gegliedert, jedoch lässt sich die Komplexität einer Reparatur teils nur bedingt anhand der Anzahl an Schritten ablesen, da die bebilderten Arbeitsschritte je nach Einschätzung des benötigten Detaillierungsgrades vom Autor festgelegt werden. Arbeitsschritte, bei denen ein erhöhtes Risiko zur Beschädigung von Produktteilen erkennbar ist, sind i.d.R. mit einem Warnsymbol und einer knappen Beschreibung des Risikos versehen. Das Risiko fließt zwar implizit in die Bewertung der Reparierbarkeit mit ein, ist aber nicht eindeutig zu quantifizieren und nach aktuellem Stand nicht als Bewertungskriterium ausgewiesen.

Die iFixit Repairability Scorecard wird im Rahmen des von der EU geförderten Projektes „sustainablySmart“ hinsichtlich der angewandten Bewertungskriterien zur Reparierbarkeit überarbeitet. Das Ziel ist es, objektive, quantitative und messbare Kriterien zu erarbeiten, die zu nachvollziehbaren und reproduzierbaren Ergebnissen führen.

### 9.2.4 Zusammenfassung und Auswertung

Um eine Übersicht über die Ergebnisse der Auswertung der einzelnen Normenschriften zu erhalten, wurde ein vereinfachtes Bewertungssystem nachfolgendem Schema entworfen. Die Leitfrage lautet dabei: Wird das jeweilige Kriterium von der Normenschrift adressiert?

Ja, wird in der Norm umfangreich behandelt, quantitativ	++
Ja, wird in der Norm beiläufig behandelt	+
Indirekte Bezugnahme	0
Nein, keinerlei Bezugnahme in der Norm	-

Tabelle 25: Übersicht über die Bewertung der jeweiligen Kriterien der Normenschriften im Untersuchungsrahmen des Forschungsvorhabens

Normen / Standards	Reparierbarkeit	Demontage	Recyclingfähigkeit	Wiederverwendung	Produktlebensdauer	Metalle	Kunststoffe
IEC/TR 62635:2012-10	-	+	++	+	-	o	o
ONR 192102:2006-09	+	+	-	+	+	o	+
Richtlinienreihe VDI 2343	+	+	in VDI 2243	+	o	+	+
Richtlinienreihe VDI 2243	+	+	-	-	-	-	-
IEEE 1874	+	+	-	-	-	-	-
PAS 1049	o	+	+	-	-	-	-
BS 8887:1	o	o	o	o	-	-	+
DIN CEN/TS 16524:2013-12	+	+	o	o	o	o	+
DIN EN 62430:2010-02	+	o	-	o	o	o	o
DIN EN ISO 14006	-	-	-	-	-	-	o
ISO/TR 14062:2002	o	o	-	o	o	o	o
iFixit Scorecard	++	+	-	-	o	-	o
EPEAT	+	+	+	+	-	-	-

### 9.2.5 Empfehlungen

Die betrachteten Normen befassen sich inhaltlich mit den sieben Kriterien, jedoch auf sehr unterschiedliche Weise und in unterschiedlicher Intensität. Die ausgewählten Normen, die teils älter sind als zehn Jahre, adressieren die heute stark in der Diskussion stehende Edel- und Sondermetallproblematik nicht, was insbesondere dem Umstand geschuldet ist, dass zur Zeit ihrer Entstehung die gesellschaftlichen Diskussionsschwerpunkte woanders lagen. Auf europäischer Ebene werden im Normungsmandat M/543 die hier zur Anwendung kommenden Kriterien ebenfalls intensiv berücksichtigt. Die Auftragnehmer schlagen die folgenden Handlungsempfehlungen für den Auftraggeber dahingehend vor, sie bei der Mitarbeit im Normungsmandat M/543 zu berücksichtigen bzw. in den laufenden Arbeitsprozess einzubringen.

In der Normungsarbeit sollte als ein bedeutendes Ziel dahingehend gearbeitet werden, dass für insbesondere den Material- und Ressourcenschutz Produkte durch Designmerkmale lange in der Nutzung gehalten, repariert und aufgerüstet werden können. Die Ergebnisse des Screenings von End-of-Life Recyclingprojekten (vgl. Kapitel 3.3) machen deutlich, dass die Gesellschaft heute von geschlossenen Materialkreisläufen noch sehr weit entfernt ist. Die Normung sollte demzufolge dahingehend arbeiten, Produkte neben Aspekten der Sicherheit vor allem robust, zuverlässig und langlebig zu machen. Die Erarbeitung von möglichst objektiven Messmethoden für Robustheit und Zuverlässigkeit kann durch Normungsarbeit sehr gut erfolgen, durch die ausgewählten Normen kann dies teils deutlich aufgezeigt werden. Hinsichtlich der End-of-Life Phase ist entscheidend, die

Informationen über die Materialgehaltsbestimmung (engl. Bill-of-Materials, BoM<sup>46</sup>) zu ermitteln und über den gesamten Produktlebenszyklus verfügbar zu machen. Die BoM wird durch Produktdesign festgelegt und ist i.d.R. aus den CAD<sup>47</sup>-Daten abzuleiten. Aus der BoM können die Informationen gewonnen werden, die für die Recyclingrate und Rückgewinnungsrate benötigt werden. Insbesondere die Normung kann die Ausweisung des BoM erwirken.

Insbesondere für Edel- und Sondermetalle gilt, dass diese in spezifischen funktionalen Bauteilen zu finden sind. Die Normung kann dahingehende Anforderungen formulieren, dass Bauteile gekennzeichnet und einfach zu entfernen sein müssen. Die Normung ist dafür prädestiniert, dass die Informationsweitergabe und das Berichtswesen einheitlich und standardisiert erfolgt, um für die End-of-Life Prozesse nutzbar und effizient zur Verfügung zu stehen. Zudem gelingt es durch Normungsarbeit besonders gut geeignete Berechnungsformeln zu entwickeln. Die Norm IEC/TR 62635:2012-10 zeigt sehr gut auf, wie ein Ansatz aussieht, was aus Sicht der Auftragnehmer weiterverfolgt werden sollte.

### 9.3 AP4: Begleitung von EU-Studien

Die in diesem Arbeitspaket durchgeführten Arbeiten dienten insbesondere zur Information an das Umweltbundesamt. Von besonderem Interesse waren eine vergleichende Analyse und Bewertung des MEerP EcoReport Tools und der REAPro Methodik.

#### 9.3.1 MEerP EcoReport Tool

Das Projektteam<sup>48</sup> arbeitete im Jahr 2013 am mittlerweile abgeschlossenen EU-Projekt "Technical assistance for a material-efficiency Ecodesign Report and Module to MEerP" mit und ist daher mit dem MEerP-Werkzeug und den Aspekten zur Materialeffizienz vertraut. Das Ziel des Projektes war es, die Bewertbarkeit von Ressourcen-/Materialeffizienz für die umweltgerechte Gestaltung von energieverbrauchsrelevanten Produkten mit Hilfe des EcoReport Tools zu erhöhen. Dafür wurde das EcoReport Tool überarbeitet und folgende Änderungen zur Bewertung der Materialeffizienz ergänzt<sup>49</sup>:

Generell handelt es sich bei der MEerP um die Methodik zur Durchführung der Vorstudien im Kontext der Ökodesign-Richtlinie (Richtlinie 2009/125/EG). Diese verfolgt den Ökobilanzansatz, jedoch mithilfe des eigens dafür geschaffenen EcoReport Tools. Dieses ist ein vereinfachtes Ökobilanz-Tool inkl. einer zu verwendenden Datenbank, was hinsichtlich der Modellierungsgenauigkeit und Datenqualität nicht mit einer vollständigen Ökobilanz vergleichbar ist.

JRC zeigte in einem Vergleich für Staubsauger, dass die Ergebnisse mit dem EcoReport Tool von den Wirkungskategorien „Total Energy“ und „Volatile Organic Compounds“ deutlich geringer ausfallen.

---

<sup>46</sup> An dieser Stelle nicht zu verwechseln mit der Stückliste (engl. Parts-List), die sich auf Baugruppen für den Zusammenbau von Produkten bezieht. In der Fertigung von Produkten werden im engl. Parts-List und Bill-of-Materials oft synonym verwendet.

<sup>47</sup> CAD steht für Computer-aided Design, rechnerunterstütztes Konstruieren von Produkten.

<sup>48</sup> Projektpartner für die Weiterentwicklung der MEerP war das Fraunhofer IZM (Bearbeitung: Marina Proske, Lutz Stobbe, Karsten Schischke), das mit der TU Berlin über einen Kooperationsvertrag verbunden ist und das von Prof. Klaus-Dieter Lang geleitet wird (zugleich Lehrstuhlinhaber am Forschungsschwerpunkt Technologien der Mikroperipherik der TU Berlin); ein Personalaustausch, gemeinsame Nutzung von Laborkapazität und Know-How-Transfer zwischen beiden Institutionen ist über den Kooperationsvertrag geregelt.

<sup>49</sup> Webseite mit allen offiziellen Versionen des EcoReport Tools und der MEerP-Methodikberichten, es enthält ebenfalls eine ungeschützte Version des EcoReport Tools, in dem alle Hintergrunddaten einsehbar sind: [http://ec.europa.eu/enterprise/policies/sustainable-business/ecodesign/methodology/index\\_en.htm](http://ec.europa.eu/enterprise/policies/sustainable-business/ecodesign/methodology/index_en.htm)

## **Ergänzung von Datensätzen zu Recyclingmaterialien (Papier und Kunststoffe)**

In einigen Ökodesign-Vorstudien wurde die Möglichkeit der Verwendung von Recyclingkunststoffen als Verbesserungsoption zur Reduzierung der Umweltwirkung benannt. Der genaue Effekt auf die Gesamtwirkung des Produktes ließ sich jedoch nicht berechnen, da entsprechende Datensätze bisher im Tool fehlten. In der aktuellen Version (V3.06) sind daher einige Datensätze für Recyclingmaterialien ergänzt. Es besteht zudem die Möglichkeit für die Nutzerinnen und Nutzer selbst weitere Datensätze zu ergänzen, wenn diese für eine Verbesserungsoption relevant erscheinen, aber noch nicht im Tool vorhanden sind.

Bei der Ergänzung der Datensätze zeigten sich aber auch die Schwächen des bisherigen Tools. So ergab sich nach Integration eines Datensatzes für Recyclingpapier, dass dieses deutlich mehr Wasser als Primärpapier verbrauchen würde. Ein Einblick in die Hintergrunddaten zeigte, dass für Primärpapier gar kein Wasserverbrauch eingetragen war. Solche Schwächen der allgemeinen Datensätze limitieren die Belastbarkeit der Ergebnisse, lassen sich jedoch mit nachträglichen Änderungen fast nicht adressieren, sondern würden eine vollständige Überarbeitung nötig machen. Solch eine Überarbeitung des Tools würde dann jedoch die Vergleichbarkeit der Ergebnisse mit bereits durchgeführten Ökodesign-Vorstudien verhindern.

## **Implementierung des „CRM indicator“ in das EcoReport Tool**

Im Rahmen der Überarbeitung der MEERP-Methodik (2011<sup>50</sup>) wurde der CRM Indicator entwickelt, der die quantitative Vergleichbarkeit der 14 von der EU im Jahr 2011 als „kritische Rohstoffe“ definierten Stoffe untereinander erlaubt<sup>51</sup>. Dabei werden die 14 kritischen Rohstoffe auf Antimon skaliert und somit eine Vergleichbarkeit der „Menge kritischer Rohstoffe“ bei der Verwendung unterschiedlicher kritischer Rohstoffe ermöglicht. Ob dies nur auf den Materialgehalt bezogen wird oder auch bei der Herstellung verwendete Mengen mit einschließt, bleibt dem Durchführenden offen. Dieser Indikator wurde in das EcoReport Tool integriert um damit die Nutzung innerhalb der Vorstudien zu erhöhen. Mit diesem Indikator wurde die Kritikalität der 14 Rohstoffe anhand der Faktoren

- ▶ Importabhängigkeit
- ▶ Verfügbarkeit von Substituten
- ▶ Recyclingraten

bewertet und auf Antimon skaliert. Eine Erweiterung auf die im Jahr 2014 veröffentlichte Liste mit 20 als „kritische Rohstoffe“ definierten Stoffe erfolgte nicht<sup>52</sup>. Die mit diesen Stoffen einhergehende Umweltwirkung wird mit diesem Indikator nicht abgebildet und kann mit dem EcoReport Tool auch noch nicht bewertet werden, da entsprechende Datensätze fehlen.

## **Implementierung der „Recyclability Benefit Rate“**

Als neues Ergebnis wurde die „Recyclability Benefit Rate“ (RBR, entwickelt von JRC) implementiert. Diese gibt nicht den Gehalt an rezyklierten Materialien wieder, sondern zeigt den Effekt auf die Gesamtwirkung, die sich durch ein verbessertes Recycling ergibt, wobei Qualitätsnachteile durch Downcycling und Energieverbräuche und Emissionen des Recyclingprozesses einbezogen werden.

---

<sup>50</sup> [http://ec.europa.eu/enterprise/policies/sustainable-business/ecodesign/methodology/files/meerp\\_methodology\\_part2\\_en.pdf](http://ec.europa.eu/enterprise/policies/sustainable-business/ecodesign/methodology/files/meerp_methodology_part2_en.pdf), S. 19

<sup>51</sup> European Commission: Report lists 14 critical mineral raw materials, [http://europa.eu/rapid/press-release\\_MEMO-10-263\\_en.htm?locale=en](http://europa.eu/rapid/press-release_MEMO-10-263_en.htm?locale=en)

<sup>52</sup> DG GROWTH: Critical Raw Materials, <http://ec.europa.eu/growth/sectors/raw-materials/specific-interest/critical/>

Die Datenlage zur RBR ist momentan noch sehr unzureichend. So benötigt man zu deren Berechnung

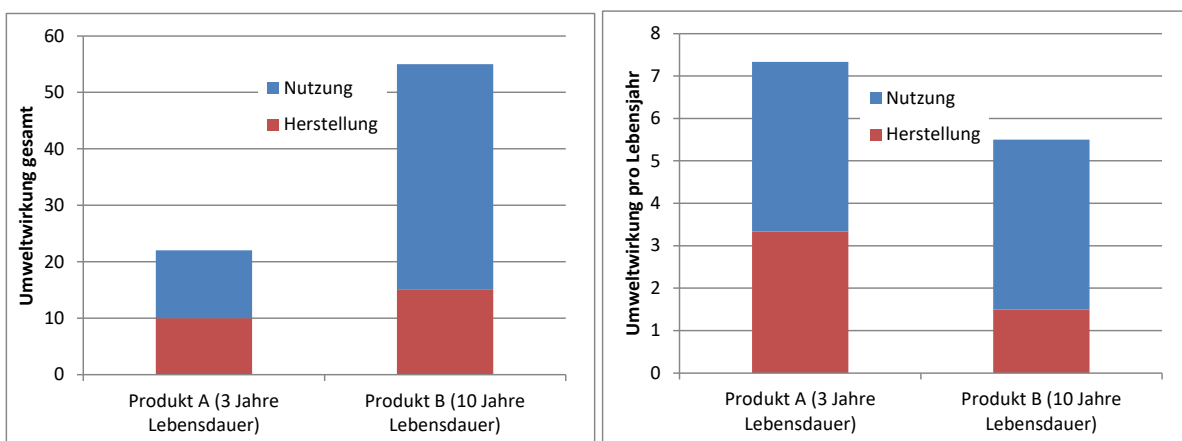
- ▶ Die Recyclingrate des jeweiligen Stoffes
- ▶ Einen Downcyclingfaktor, der sich z.B. aus Kostenunterschieden zwischen Primär- und Sekundärmaterial, aber auch aus unterschiedlichen Festigkeiten oder anderen Materialparametern ergeben kann
- ▶ Die Umweltwirkungen, die sich aus dem Recyclingprozess ergeben (z.B. Emissionen durch Transport zum Recyclingort, Wasserverbrauch durch Materialsäuberung, Energieverbrauch bei der Sortierung, Zerkleinerung, etc.)

Trotz der vielen Inputs, die vom Nutzer des EcoReport Tools nötig sind um den RBR abzubilden, wurde dieser nach Diskussion mit JRC in das EcoReport Tool eingebaut, um den Nutzer für diese Thematik zu sensibilisieren, auch wenn nicht alle Daten zur Verfügung stehen.

### Lebensdauer

Die Lebensdauer ist ein kritischer und wichtiger Faktor im Hinblick auf Materialeffizienz und die gesamte Umweltwirkung eines Produktes. Da sich aber bei der rein quantitativen Darstellung der Wirkungskategorieergebnisse von ErP<sup>53</sup> eine lange Lebensdauer stets in hohen (ergo schlechten) Werten auswirkt, wurde die Ergebnisdarstellung im EcoReport Tool um das „Ergebnis pro Nutzungsjahr“ erweitert, was einen einfacheren und intuitiveren Vergleich ermöglicht (siehe Abbildung 78). Links ist die klassische Darstellung der Umweltwirkung eines Produktes über den gesamten Nutzungszeitraum dargestellt, welches üblicherweise bei langlebigen Produkten höher ist, da die Umweltwirkung der Nutzungsphase einen längeren Zeitraum umfasst. Da diese Darstellung für das kurzlebige Produkt keine notwendige Ersatzproduktion miteinschließt, wird die Darstellung pro Nutzungsjahr gewählt (rechts), welche die Umweltwirkung der Nutzungsphase, aber auch der Herstellungsphase durch die Anzahl der Lebensjahre teilt ohne ein fiktives Ersatzprodukt berechnen zu müssen.

Abbildung 78: Darstellung der Umweltwirkung insgesamt und pro Lebensjahr für zwei fiktive Produkte



Quelle: (Mudgal et al. 2013)

<sup>53</sup> ErP: Energy-related Product, energieverbrauchsrelevantes Produkt

### 9.3.2 REAPro-Methodik

“Resource efficiency in product policies” ist das Folgeprojekt zu einer im Jahr 2012 abgeschlossenen Studie Ardente & Mathieux (Ardente und Mathieux 2012) des JRC, in deren Rahmen mehrere produktspezifische Fallstudien durchgeführt werden, welche teilweise parallel zu laufenden Vorstudien unter der Ökodesign-Richtlinie laufen. In diesem Projekt werden Kennzahlen zur Ressourceneffizienz erarbeitet. Dieses ReaPro-Kennzahlengerüst wird im Folgenden auftragsgemäß mit dem MEERP EcoReport Tool verglichen. Dabei ist zu beachten, dass es sich um zwei verschiedene Konzepte handelt. Bei dem MEERP EcoReport Tool handelt es sich um ein Werkzeug für vereinfachte Ökobilanzen, die ReaPro-Methodik ist ein Set von Kennzahlen, die weitestgehend auf die Entsorgungsphase ausgerichtet sind. Es treffen daher nicht alle Vergleichskriterien auf beide Methodiken zu.

Tabelle 26: Vergleich MEERP EcoReport Tool und ReaPro-Methodik

	MEERP	ReaPro
Methodik oder Tool	Methodik zur Durchführung der Vorbereitungsstudien zur Ökodesign-RL mit EcoReport Tool für vereinfachte Ökobilanzen	Methodik mit einzelnen Kennzahlen
Ökobilanz-Ansatz	ja	Einzelne Kennzahlen, die zum Teil den Ökobilanz-Ansatz mittragen (Recyclability Benefit Rate, Reusability Benefit Rate und Recoverability Benefit Rate)
Welche Lebensphasen werden betrachtet?	Alle Lebensphasen	Fokus auf End-of-Life
Welche Wirkungskategorien werden betrachtet?	Ressourcen und Abfall Gesamtenergie (GER) Elektrizität (in Primär-MJ) Prozesswasser Kühlwasser Abfall, nicht gefährlich/Deponierung Abfall, gefährlich/Verbrennung Emissionen (Luft) Treibhausgase in GWP100 Versauerung Volatile Organic Compounds (VOC) Persistent Organic Pollutants (POP) Schwermetalle PAHs Particulate Matter (PM, Staub) Emissionen (Wasser) Schwermetalle Eutrophierung	Recyclability Benefit Rate, Reusability Benefit Rate und Recoverability Benefit Rate lassen sich auf alle Wirkungskategorien anwenden. Die anderen Kennzahlen stehen für sich selbst, unabhängig von einer Wirkungskategorie.
Welche Kennzahlen sind enthalten	Der Ökobilanzansatz arbeitet nicht mit Kennzahlen als solches.	Die Methodik enthält folgende Kennzahlen: Raten (massenbezogen): Reusability Rate Recyclability Rate Extended Recyclability Rate Recoverability Rate

	MEErP	ReaPro
		Recycled Content Benefit Raten (lebenszyklusbezogen) Recyclability Benefit Rate: Reusability Benefit Rate Recoverability Benefit Rate Durability of Products
Datenlage	Das EcoReport Tool beinhaltet die zur Berechnung zu verwendenden Daten. Diese sind zum Teil stark veraltet und wenig transparent. Das EcoReport Tool verfügt über die Möglichkeit selbst weitere Datensätze zu implementieren. Dies wird in der Anwendung in den Vorstudien zur Ökodesign-RL jedoch kaum genutzt.	Der Bericht zu ReaPro gibt im Anhang einige Daten an und nennt mögliche Datenquellen, sowie Möglichkeiten Daten selbst zu erheben.
Aussage	Bewertung mit dem EcoReport Tool gibt zum einen absoluten Wert für die Umweltwirkung (hinsichtlich der gelisteten Wirkungskategorien) eines Produktes an und ermöglicht zum anderen einen Vergleich zwischen verschiedenen Produkten.	Die Kennzahlen erlauben den Vergleich von Produkten hinsichtlich ihrer EoL-Performance und den Vergleich verschiedener EoL-Szenarien. Die Indikatoren R Benefit Rate erlauben zudem die Einschätzung, in welchen Verhältnis ein bestimmtes EoL-Szenario zu der Gesamtumweltperformance des Produktes steht.
Verlässlichkeit	Die Daten sind zum Teil stark veraltet und häufig intransparent. Insgesamt stehen vglw. wenige Daten zur Verfügung. Gerade hinsichtlich der Elektronikdatensätze ist die Realitätsnähe fraglich. Insgesamt ist daher die Verlässlichkeit der Bewertung nur bedingt gegeben und hängt vom modellierten Produkt ab. Je höher der Anteil von Elektronik im Produkt, desto weniger verlässlich ist das Ergebnis.	Die Verlässlichkeit der Aussagen zu den einzelnen Kennzahlen hängt von den gewählten Daten ab. Der ReaPro-Bericht gibt Hinweise, wie qualitativ gute Daten beschafft und erhoben werden können. So sind verlässliche Aussagen möglich, die spezifische Verlässlichkeit muss jedoch bei jeder Bewertung auf Basis der verwendeten Daten abgeschätzt werden.
Wiederverwendbarkeit (Reusability)	Für das Gesamtprodukt kann angegeben werden, wieviel Massenprozent wiedergenutzt werden. Für diesen Prozentsatz werden dann 75% <sup>54</sup> der Umweltwirkung des Herstellungsprozesses gutgeschrieben.	Reusability Rate RuseR: Prozentangabe, wieviel des Produktes wiedergenutzt werden kann (massenbezogen) <sup>55</sup> Die Angaben beziehen sich nur auf post-consumer Abfälle

<sup>54</sup> Default-Wert, der sich vom Nutzer anpassen lässt.

<sup>55</sup> Die entsprechende Formel findet sich im ReaPro-Bericht auf S. 24.

	MEErP	ReaPro
		<p>Um einen Part als wiedernutzbar zu deklarieren, müssen zwei Bedingungen erfüllt sein:</p> <p>Das Produktteil oder die Komponente muss trennbar sein, ohne die funktionale Integrität des Teils oder der Komponente zu beeinträchtigen.</p> <p>Der Hersteller muss nachweisen, dass ein kommerzielles Re-use- und Refurbishment-System für die entsprechenden Komponenten unter Beachtung regulatorischer und Marktanforderungen besteht.</p> <p>Reusability Benefit Rate RuseBR: Die Benefit Rate setzt den Vorteil durch Re-use ins Verhältnis zum Gesamtlebenszyklus des Produktes.<sup>56</sup> Die Benefit Rate wird für jede Wirkungskategorie getrennt berechnet.</p>
Recyclingfähigkeit (Recyclability)	<p>Für die großen Materialgruppen</p> <p>Massenkunststoffe</p> <p>Technische Kunststoffe</p> <p>Eisen-Metalle</p> <p>Nichteisen-Metalle</p> <p>Beschichtungen</p> <p>Elektronik</p> <p>Sonstiges</p> <p>Extra (vom Nutzer selbst eingetragene Datensätze)</p> <p>Hilfsstoffe</p> <p>kann angegeben werden wieviel Massenprozent recycelt werden. Für diesen Prozentsatz werden dann 40%<sup>57</sup> der Umweltwirkung des Herstellungsprozesses gutgeschrieben.</p> <p>Die Recyclability Benefit Rate der ReaPro-Methodik wurde für Kunststoffe in das EcoReport Tool integriert und wird als separates Ergebnis ausgegeben.</p>	<p>Recyclability Rate RcycR: Prozentangabe, wieviel des Produktes recycelt werden kann (massenbezogen) multipliziert mit der spezifischen Recyclingrate im Recyclingprozess<sup>58</sup></p> <p>Spezifische EoL-Szenarien und Recyclingraten, auf denen die Annahmen beruhen, müssen definiert werden</p> <p>Extended Recyclability Rate Rex cycR: <math>Rex\ cycR = RcycR + RuseR</math></p> <p>Recyclability Benefit Rate RcycBR: Die Benefit Rate setzt den Vorteil durch Recycling ins Verhältnis zum Gesamtlebenszyklus des Produktes.<sup>59</sup> Dabei wird der Aufwand für den Recyclingprozess selbst als auch ein sogenannter Downcycling-Faktor miteinbezogen.</p> <p>Der Downcycling-Faktor kann anhand physikalischer oder ökonomischer Parameter berechnet werden.</p> <p>Die Benefit Rate wird für jede Wirkungskategorie getrennt berechnet.</p>

<sup>56</sup> Die entsprechenden Formeln finden sich im ReaPro-Bericht auf S. 44.

<sup>57</sup> Default-Wert, der sich vom Nutzer anpassen lässt.

<sup>58</sup> Die entsprechenden Formeln finden sich im ReaPro-Bericht auf S. 25.

<sup>59</sup> Die entsprechenden Formeln finden sich im ReaPro-Bericht ab S. 39.

	MEErP	ReaPro
Haltbarkeit/Lebensdauer	Die Lebensdauer wird im EcoReport Tool als Basiswert für die Rechnung eingetragen. Eine Betrachtung der Lebensdauer anhand von Haltbarkeitsaspekten sollte nach der MEErP-Methodik innerhalb der ErP-Vorstudien durchgeführt werden, ist aber nicht standardisiert. Des Weiteren wird davon ausgegangen, dass die Lebensdauer der Nutzungsdauer entspricht. Die eingetragene Lebensdauer im Tool („lifetime“) kann daher je nach Intention der Bilanzierung auch als Nutzungsdauer angesehen werden. Die Ergebnisse im EcoReport Tool werden sowohl für die Gesamtlebensdauer als auch pro Lebensjahr dargestellt um einfacher Produkte mit unterschiedlicher Lebens-/Nutzungsdauer vergleichen zu können.	Duarability of Products: Lebenszyklusansatz, wird für jede Wirkungskategorie einzeln betrachtet Berechnet, in welchen Fällen eine verlängerte Nutzung eines Produktes sinnvoll ist (wenn 2. Produkt mehr oder gleichviel Energie in der Nutzung verbraucht als erstes, dann ist verlängerte Nutzung nach der Berechnung immer vorteilhaft) <sup>60</sup> Laut Meinung der Autoren bildet die Berechnung allerdings nicht direkt den Aspekt „Durability“ ab. Ein Vergleich von einem robusten (und dadurch länger nutzbaren) Produkt mit einem weniger Robusten findet nicht statt.
Reparierbarkeit	Nicht adressiert	Nicht adressiert
Demontage	Nicht adressiert	Nicht adressiert
Einsatz von rezykliertem Material und/oder wiederwendeten Komponenten	Im EcoReport Tool können rezyklierte Rohstoffe als Basismaterial ausgewählt werden: Papier HDPE PVC PET Für diese Materialien ist ein anderer Herstellungsaufwand hinterlegt.	Post-consumer recycled content index: Prozentangabe, wieviel postconsumer Rezyklatanteil das Produkt enthält (massenbezogen) <sup>61</sup> Recycled Content Benefit index: Der Benefit Index setzt den Vorteil durch den Rezyklatanteil ins Verhältnis zum Gesamtlebenszyklus des Produktes. <sup>62</sup> Der Aufwand für die Rezyklatherstellung wird dabei miteinbezogen. Der Benefit Index wird für jede Wirkungskategorie getrennt berechnet.
Kritikalität/kritische Rohstoffe	Im Rahmen der MEErP-Methodik wurde ein eigener Indikator zur Verwendung kritischer Rohstoffe entwickelt, der auch im EcoReport Tool implementiert ist. Adressiert die 14 „kritischen Rohstoffe“ nach EU-Definition und wägt diese quantitativ zueinander ab	Nicht adressiert

<sup>60</sup> Formeln finden sich im ReaPro-Bericht ab S. 75.

<sup>61</sup> Die entsprechende Formel findet sich im ReaPro-Bericht auf S. 56.

<sup>62</sup> Die entsprechenden Formeln finden sich im ReaPro-Bericht ab S. 56.

	MEErP	ReaPro
	<p>Ob dieser Indikator in den Vorstudien tatsächlich verwendet wird, ist fraglich (bisher in Vorstudien nicht geschehen), da Daten hierzu fehlen und sich in einfachen Produktdemontagen auch nicht identifizieren lassen</p> <p>In den vereinfachten Ökobilanz mit dem EcoReport Tool kann die Umweltwirkung der kritischer Rohstoffe nicht gesondert betrachtet werden, Daten hierzu fehlen weitestgehend</p>	
Kunststoffe	<p>Das EcoReport Tool enthält Datensätze zur Bewertung der folgenden Kunststoffe:</p> <p>Bulk Plastics</p> <p>LDPE</p> <p>HDPRE</p> <p>HDPE (recycelt)</p> <p>LLDPE</p> <p>PP</p> <p>PS</p> <p>EPS</p> <p>HI-PS</p> <p>PVC</p> <p>PVC (recycelt)</p> <p>SAN</p> <p>PET</p> <p>PET (recycelt)</p> <p>ABS</p> <p>Technical Plastics</p> <p>PA6</p> <p>PC</p> <p>PMMA</p> <p>Epoxy</p> <p>Rigid PUR</p> <p>Flex PUR</p> <p>Talcum Filler</p> <p>E-glass fibre</p> <p>Aramid fibre</p>	Nicht direkt adressiert

Die ReaPro-Methodik hat mit ihren Kennzahlen einen klaren Fokus auf das Produktlebensende (Reuse, Recycling, Recovery). Dementsprechend richten sich auch die aus diesem Ansatz gewonnenen Erkenntnisse und abgeleiteten Maßnahmen überwiegend auf das Produktlebensende.

Die Methodik wurde bereits in einigen Fallbeispielen angewendet.

- ▶ Drucker
- ▶ Geschirrspüler
- ▶ LCD-Fernseher

- ▶ Waschmaschine
- ▶ Staubsauger
- ▶ Server

Die Anwendung der ReaPro-Methodik und Kennzahlen setzt die Definition eines produktspezifischen Recycling-Szenarios voraus, welches auf das Produkt angewendet wird. Dies umfasst folgende Aspekte:

- ▶ Welche Komponenten sind wiederverwendbar (Re-use, in allen Fallbeispielen 0)?
- ▶ Welche Komponenten sind rezyklierbar?
- ▶ Welche Komponenten sind energetisch verwertbar?
- ▶ Wie sehen die Behandlungsschritte (z.B. manuelle Demontage, Shreddern, etc.) aus und welche Recyclingquoten ergeben sich daraus?

Die Kennzahlen für ein Produkt basieren daher nicht allein auf den Informationen zum Produktdesign, sondern auch auf dem zugrunde gelegten Recyclingszenario und können sich beim gleichen Produkt durch unterschiedliche Szenarien unterscheiden. Die Kennzahlen können daher nicht nur zur Produktbewertung, sondern auch zur Bewertung aktueller oder geplanter Vorgehensweisen mit dem Ziel des Recyclings genutzt werden. Die eigentliche Umweltbewertung, die für die Bestimmung der „Benefit“-Kennzahlen der ReaPro-Methodik notwendig ist, wurde mit dem MEERP EcoReport Tool durchgeführt, dem teilweise weitere für die Bewertung notwendige Daten hinzugefügt wurden.

Die Fallbeispiele werden im Folgenden individuell ausgewertet. Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die abgeleiteten Anforderungen sich überwiegend auf das Produktlebensende beziehen und Fragen des „Design for Recycling“ adressieren. Häufig genannte Maßnahmen sind:

- ▶ Verwendung von Recyclingkunststoffen in x %
- ▶ Zeitvorgaben für De- und Remontage einzelner Komponenten (Geschirrspüler, Fernseher)
- ▶ Deklaration der Mengen seltener Erden (Fernseher, Waschmaschinen)

Für viele der formulierten Empfehlungen (speziell die Überprüfung der Zeitvorgaben) fehlen – wie auch von JRC in den Beispielen selbst angemerkt – noch die Verifikationsmöglichkeiten. Hinsichtlich der Zeitvorgaben wurden Beobachtungen bei Behandlungs- und Recyclinganlagen gemacht. Wie allerdings die sehr spezifischen Zeitvorgaben definiert wurden, ist nicht erläutert.

Bei den zugrundeliegenden Umweltbewertungen erwies sich die Verfügbarkeit von Daten zu Recyclingkunststoffen stets als Problem. Die jeweiligen Fallbeispiele gehen mit den fehlenden Daten jedoch nicht einheitlich um:

- ▶ Waschmaschinen: vernachlässigt
- ▶ LCD-Fernseher: pauschal 24% der Umweltwirkung des Primärkunststoffes
- ▶ Geschirrspülmaschinen: pauschal 10% der Umweltwirkung des Primärkunststoffes

### **Fallbeispiel Drucker**

Das Fallbeispiel für Drucker ist in der Studie (Ardente und Mathieux 2012) enthalten, unterscheidet sich aber von den anderen Beispielen, da die Kennzahlen von ReaPro nicht berechnet wurden, sondern nur eine allgemeine Betrachtung stattfand.

Die Umweltbewertung der Ökodesign-Vorstudie zeigte, dass die Drucker zum überwiegenden Massenanteil aus Kunststoffen bestehen, diese daher ein erster Ansatzpunkt für mögliche Maßnahmen sind.

Die Bewertung von Maßnahmen erweist sich aber als schwierig, da Ökobilanzdaten für Recyclingkunststoffe weitestgehend fehlen, was für eine Beurteilung der tatsächlichen Vorteilhaftigkeit notwendig wäre.

Vorschläge für mögliche Ökodesign-Anforderungen:

- ▶ 10% Recyclingkunststoff (post consumer) einsetzen

### **Fallbeispiel Waschmaschine**

Im Fallbeispiel Waschmaschinen (Ardente und Mathieux 2012) werden anders als für die Drucker die ReaPro-Kennzahlen berechnet. Dies erfolgt getrennt für je ein Waschmaschinenbeispiel mit Beton- bzw. Gusseisengewicht. Für die zwei Beispiele ergeben sich deutlich andere Recyclingraten, da angenommen wird, dass das Gusseisengewicht im Gegensatz zum Betongewicht vollständig recycelt werden kann.

Die Bill of Materials der Geräte basiert auf Kommunikation mit Recyclern, da Herstellerdaten nicht verfügbar waren.

Für die zwei Waschmaschinenbeispiele werden jeweils die Recycling-/Recovery-Raten als auch die dazugehörigen Benefit-Raten berechnet. Es zeigt sich, dass trotz hoher Recyclingraten – je nach Wirkungskategorie – die Benefit-Raten auf den ganzen Lebensweg bezogen eher niedrig sind. Speziell die Wirkungskategorie Treibhausgaspotential wird überwiegend von der Nutzungsphase geprägt, so dass der Recycling-Benefit bei einer Recycling-Rate von 78% (WM2) nur knapp 11% beträgt. Anders sieht dies beim Abiotic Resource Depletion Potential (ADP) aus, bei dem sich bei gleicher Recycling-Rate ein Benefit von knapp 34% ergibt.

Bei der Umweltbewertung erwies sich die Verfügbarkeit von Lebenszyklusdaten von Recyclingprozessen für Kunststoffe – wie auch beim Drucker-Fallbeispiel – als Problem. Für Waschmaschinen wurden Kunststoffe als wenig relevant angesehen und die entsprechende Umweltwirkung der Sekundärkunststoffe daher vernachlässigt. Werden diese in der Bilanz vernachlässigt (also auf null gesetzt), kann das prinzipiell zu einer Überschätzung der Benefit-Raten führen.

Der Indikator hinsichtlich dem Gehalt an Recyclingmaterialien und der Durability Index wurden im Rahmen des Waschmaschinen Fallbeispiels nicht bestimmt.

Vorschläge für mögliche Ökodesign-Anforderungen:

- ▶ Bessere Demontage der Leiterplatten: Leiterplatten > 10 cm<sup>2</sup> sollen innerhalb von 40 s durch geschultes Personal mit üblicherweise vorhandenem Equipment entfernt werden können.
- ▶ Bessere Demontage der LCD-Bildschirme (wenn vorhanden): Komponenten mit LCD-Bildschirmen sollen innerhalb von 30 s durch geschultes Personal mit üblicherweise vorhandenem Equipment entfernt werden können.
- ▶ Bessere Demontage des Motors zum Recycling von Kupfer, Stahl und Neodym (wenn vorhanden): Motoren sollen innerhalb von 50 s durch geschultes Personal mit üblicherweise vorhandenem Equipment entfernt werden können.
- ▶ Informationsbereitstellung: Deklaration des Gehalts an Seltenen Erden (Typ und Menge) im Motor der Waschmaschine.
- ▶ Deklaration und/oder Grenzwerte für RRR und RRR Benefit Rates: Hersteller sollen für eine definierte Wirkungskategorie die Recyclability Benefit Rate des Produktes ausweisen.

### **Fallbeispiel LCD-Fernseher**

Im Fallbeispiel LCD-Fernseher (Ardente und Mathieux 2012) werden die ReaPro-Kennzahlen RRR-Rates und RRR-Benefit-Rates bestimmt. Der Gehalt an Recyclingmaterialien und der Durability-Index

werden nicht bestimmt. Es wird ein aktuelles und ein dynamisches (für zukünftige Recyclingarten) EoL-Szenario definiert. Das aktuelle Szenario nimmt einen großen Teil manueller Demontage an und damit verbundene hohe Recyclingraten. Für das dynamische Szenario wird angenommen, dass manuelle Demontage langfristig nicht ökonomisch ist und mit verbesserten automatischen Prozessen ein Umstieg erfolgt, der dann allerdings geringere Recyclingraten für die einzelnen Stoffströme aufweist (z.B. keine Trennung der Leiterplatten).

Für den Fernseher ergibt sich eine hohe Recyclingrate von 71%. Für Kunststoff wird eine Recyclingrate von 78% angenommen, was u.a. auf der Annahme beruht, dass im PMMA-Board und ABS-Kunststoffe (größter Kunststoffmassenanteil) keine Flammschutzmittel enthalten sind. Mit Flammschutzmitteln in einzelnen Kunststoffteilen (z.B. Rahmen) würde die Recyclingrate für Kunststoffe auf 44% sinken.

Auch bei der Umweltbewertung der Fernseher erwies sich die Verfügbarkeit von Lebenszyklusdaten zu recycelten Kunststoffen als Problem. Anders als bei den Waschmaschinen wurden diese hier aber nicht als vernachlässigbar angenommen. Es wurde pauschal angenommen, dass Sekundärkunststoffe eine Umweltwirkung von 24% des jeweiligen Primärkunststoffes haben. Dies ist auf Daten für rezykliertes Hi-PS für die Umweltwirkung GER (Global Energy Requirement) zurückzuführen ist, für das als Daten vorliegen (siehe auch Fallbeispiel Drucker).

Hinsichtlich der RRR-Benefit-Raten zeigt sich wieder, dass für Wirkungskategorien, deren Hauptanteil durch die Nutzung verursacht wird (z.B. GWP), trotz hoher Recyclingraten nur ein Bruchteil der Umweltwirkung durch Recycling reduziert werden kann. Für andere Wirkungskategorien wie  $ADP_{\text{fossil}}$  kann fast die gesamte Wirkung (95%) eingespart werden.

Vorschläge für mögliche Ökodesign-Anforderungen:

- ▶ Demontage der PMMA-Scheibe: Die PMMA-Scheibe sollte innerhalb von 120 s durch geschultes Personal mit üblicherweise vorhandenem Equipment entfernt werden können.
- ▶ Demontage des LCD-Bildschirms: LCD-Bildschirm > 100 cm<sup>2</sup> sollten innerhalb von 150 s durch geschultes Personal mit üblicherweise vorhandenem Equipment entfernt werden können.
- ▶ Demontage der Leuchtstofflampen: Die Demontierbarkeit aller Leuchtstofflampen sollte innerhalb von 180 s durch geschultes Personal mit üblicherweise vorhandenem Equipment möglich sein.
- ▶ Demontage der Leiterplatten: Die manuelle Demontage der Leiterplatten > 10 cm<sup>2</sup> sollte innerhalb von 180 s durch geschultes Personal mit üblicherweise vorhandenem Equipment möglich sein.
- ▶ Demontage von Kernkomponenten: Fluoreszenzlampen und LCD-Bildschirme > 100 cm<sup>2</sup> sollten innerhalb von 240 s durch geschultes Personal mit üblicherweise vorhandenem Equipment entfernt werden können.
- ▶ Information zum Gehalt seltener Erden: Hersteller sollten den Indiumgehalt im LCD-Fernseher deklarieren.
- ▶ Kunststoffkennzeichnung: Hersteller sollten Kunststoffteile > 25 g (vom PMMA-Board abgesehen) hinsichtlich des Kunststofftyps und des Gehalts an Füllstoffen und Flammschutzmitteln gemäß ISO 11469:2000, ISO 1043-2:2010 und ISO 1043-4:1998 kennzeichnen. Kunststoffteile > 200 g sollten so gekennzeichnet sein, dass die Markierung hinsichtlich Größe und Positionierung leicht von Arbeitern identifiziert werden können.
- ▶ Die Recyclability Rate für Kunststoffe des LCD-Fernseher sollte > 80% sein.

### Fallbeispiel Geschirrspüler

Für das Fallbeispiel Geschirrspüler wurden alle ReaPro-Kennzahlen inkl. Gehalt an Recyclingmaterial und Durability-Index bestimmt.

Das EoL-Szenario wurde analog zum EoL-Szenario des Waschmaschinen-Fallbeispiels definiert.

Aufgrund der fehlenden Lebenszyklusdaten von Sekundärkunststoffen wurde pauschal angenommen, dass Sekundärkunststoffe eine Umweltwirkung von 10% des jeweiligen Primärkunststoffes haben.

Recycling wirkt sich signifikant nur auf die Wirkungskategorien  $ADP_{\text{elementar}}$ , Ökotoxizität und Frischwassereutrophierung aus, wobei unterschiedliche Annahmen für die EoL-Szenarien sich nur bei  $ADP_{\text{elementar}}$  und Ökotoxizität bemerkbar machen.

Der Einsatz von Recyclingmaterialien wirkt sich laut der Berechnung nur sehr gering auf die Umweltwirkung  $ADP_{\text{fossil}}$  aus.

Vorschläge für mögliche Ökodesign-Anforderungen:

- ▶ Demontage von Kernkomponenten: Leiterplatten > 10 cm<sup>2</sup>, LCD-Bildschirme und Pumpen (Umwälzpumpe und Entwässerungspumpe) sollten innerhalb von 300 s durch geschultes Personal entfernt werden können.
- ▶ Ersatzteile von Kernkomponenten: Hersteller sollten funktionale Kernkomponenten (inkl. Pumpen, Leiterplatten, Heizsystem, Thermostat, Ventile, Filter, Schläuche, Sprüharme, Tür, Paneele, Dichtungen und Rahmen) derartig designen, dass
  - Jedes Teil reversibel in weniger als 20 min zum Ersatz oder zur Reparatur demontiert werden kann,
  - Ersatzteile der Kernkomponenten zum Kauf verfügbar sind.
- ▶ Detaillierte Informationen hinsichtlich Demontage und Reparatur der Kernkomponenten sollen in Gebrauchsanleitungen und auf Herstellerwebseiten verfügbar sein. Hersteller sollen eine Liste von Hinweisen und Vorschlägen zu Verlängerung der Lebensdauer zur Verfügung stellen.
- ▶ Verlängerte Garantie auf Kernkomponenten: Funktionale Kernkomponenten (inkl. Pumpen, Elektronik, Heizsystem und Türpaneele) sollen eine Mindestgarantie (im Vergleich zur grundlegenden Produktgarantie) von 2 Jahren haben.

### Fallbeispiel Staubsauger

Das Fallbeispiel Staubsauger ist ein unabhängiger Bericht des JRC (Bobba et al. 2015), getrennt von den vorangegangenen Fallbeispielen.

Die Ökobilanz wurde mit GaBi 6 und der dazugehörigen Datenbank durchgeführt. Die Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- ▶ GWP wird dominiert vom Energieverbrauch in der Nutzungsphase
- ▶  $ADP$  (mineral) wird dominiert von der Herstellungsphase
- ▶ Humantoxizität (cancer) wird etwa zu gleichen Teilen von Herstellungs- und Nutzungsphase beeinflusst

Eine Verlängerung der Lebensdauer wirkt sich positiv auf die Wirkungskategorie GWP aus verglichen mit einem um 15% effizienteren Neuprodukt. Allerdings reduziert sich die positive Wirkung, je effizienter das Neugerät ist und kehrt sich hinsichtlich GWP bei etwa 26% Effizienzzuwachs um. Bei den Wirkungskategorien wie  $ADP$  und Humantoxizität, die eher von der Herstellungsphase getrieben sind, ist der Vorteil von langlebigen Produkten deutlich höher und relativ unabhängig von den Effizienzzuwächsen bei den Neuprodukten.

Der Bericht zeigt auf, dass in fast allen untersuchten Szenarien für Staubsauger, sich Langlebigkeit positiv auf die Umweltwirkung auswirkt, so dass Anforderungen hinsichtlich Haltbarkeit und Reparierbarkeit von Staubsaugern aus Sicht des JRC sinnvoll sind. Der Bericht enthält jedoch keine konkreten Vorschläge für Ökodesignanforderungen.

## Fallbeispiel Server

Das Fallbeispiel Server ist ein unabhängiger Bericht des JRC (Talens Peiró et al. 2015), getrennt von den vorangegangenen Fallbeispielen. Die Studie prüft die in der Ökodesign-Vorstudie für Server getroffenen Annahmen und Aussagen und führt eine Ökobilanz (mit ecoinvent-, GaBi-, sowie weiteren Literaturdatensätzen) durch. Ebenso wird der CRM-Gehalt bilanziert und unterschiedliche Ökodesignvorschläge untersucht. Fokus der Untersuchungen sind die Server selbst und nicht die umgebende Infrastruktur (Stromversorgung, Netzwerk, Kühlung, etc.).

Vorschläge für mögliche Ökodesignanforderungen:

- ▶ Anforderungen an Server mit wiederverwendeten Bauteilen:
  - Vorbedingung: Server ohne wiederverwendete Bauteile überschreiten im Energieverbrauch nicht die ETEC-Werte (jährlicher Gesamtenergiebedarf in kWh/ Jahr<sup>63</sup>).
  - Der jährliche Energieverbrauch von Servern, die mindestens Festplatte (HDD), Speicherkarten Mainboard wiederverwenden, soll „ $\delta j \cdot ETEC$ “ (in kWh/Jahr) nicht überschreiten.  $\delta j$  wird einen Wert zwischen 7% und 20%, abhängig von der Anzahl der wiederverwendeten Komponenten, haben.
- ▶ Anmerkung: Auf Basis des beschreibenden Textes wird deutlich, dass Servern mit wiederverwendeten Komponenten ein höherer Energieverbrauch zugestanden werden soll. Die Formel „ $\delta j \cdot ETEC$ “ drückt allerdings das Gegenteil aus. Wahrscheinlich ist „ $(1+\delta j) \cdot ETEC$ “ gemeint.
- ▶ Design für Demontierbarkeit, Reparatur, Wiederverwendung, Recycling und Verwertung: Hersteller sollen sicherstellen, dass das Serverdesign die Demontage des Gehäuses per Hand mit üblicherweise vorhandenen Werkzeugen erlaubt. Die folgenden Komponenten sollen dabei identifiziert werden, erreichbar und entfernbar sein (wenn vorhanden):
  - Leiterplatten inkl. Speicherkarten (> 10 cm<sup>2</sup>)
  - Batterien
  - Festplatten (HDD)
  - Prozessor
- ▶ Diese Komponenten sollen zugänglich sein. Hierfür sollen detaillierte Informationen bereitstehen (notwendiges Werkzeug und Arbeitsschritte, Verbindungstyp). Keine der Teile sollen verklebt oder verschweißt sein (Ausnahmen könnte es für angeklebte Heatsinks auf der Leiterplatte geben). Datenlöschung von potentiell wiedernutzbaren Komponenten (z.B. Festplatten, Speicherkarten) soll möglich sein.
- ▶ Technische Dokumentation: Hersteller und/oder Importeure sollen einen „Ressourceneffizienzbericht“ zur Verfügung stellen, der Informationen beinhaltet, welche Komponenten zur Demontage, Wiederverwendung, Recycling und/oder Verwertung relevant sind. Dieser Bericht soll für jede Architektur einer Produktfamilie online für Dritte bereitgestellt werden und mindestens 7 Jahre nach Verkaufsende zur Verfügung stehen. Folgende Punkte sollten enthalten sein:
  - Explosionsdiagramm des Produktes, welches die Position von Komponenten/Materialien mit speziellen Anforderungen (nach WEEE-Richtlinie 2012/19, Anhang VII) sowie den Komponenten Leiterplatte, Batterien, Festplatten, Prozessor, inkl. der Spezifikation dieser Komponenten, beinhaltet.
- ▶ Dokumentation des Demontagevorgehens, inkl. Schritt-für-Schritt-Anleitung, benötigtes Werkzeug, Verbindungstyp

<sup>63</sup> TEC: total energy consumption

- ▶ Die letzte Version der Firmware soll für Firmen zur Verfügung stehen, die zuständig für Wartung, Wiederverwendung und Upgrades (inkl. Zwischenhändler, Ersatzteilvertreiber und –Reparateure, Drittanbieter für Reparatur) sind, um Funktionalität und Kompatibilität der verschiedenen Komponenten im Server zu gewährleisten.
- ▶ Kritische Rohstoffe: Informationen, wo und welche Mengen kritischer Rohmaterialien (CRM), speziell seltene Erden in Festplatten (HDD) enthalten sind, sollen vom Hersteller für jede Architektur einer Produktfamilie angegeben werden. Diese Information soll in eine zentralisierte Datenbank eingespeist werden, die von der Industrie organisiert wird und entweder für Recyclingunternehmen zugänglich ist oder entsprechende Berichte zur Verfügung gestellt werden.

## 9.4 Protokoll der Abschlussveranstaltung mit Teilnehmern des Begleitkreises am 17.04.2018 in Berlin

Das vorliegende Dokument gibt die bei der Abschlussveranstaltung geführten Diskussionen zu den im Forschungsvorhaben erarbeiteten Designanforderungen an die untersuchten Produktgruppen sowie zu den produktgruppenübergreifenden Anforderungen wieder. Die Stellungnahmen der Teilnehmer wurden redaktionell überarbeitet, jedoch möglichst inhaltsgetreu wiedergegeben. Beispielsweise wurden mehrere Aussagen zum gleichen Thema zusammengefasst.

Es wird darauf hingewiesen, dass die Aussagen von Vertretern der Teilnehmenden Unternehmen und Organisationen deren Ansichten widerspiegeln und daher keine Allgemeingültigkeit haben oder eine Übertragbarkeit auf ganze Branchen zulassen. Die Veranstaltung hatte vielmehr zum Ziel, den Teilnehmern des Begleitkreises die Möglichkeit zu eröffnen, individuelle Stellungnahmen zu den wesentlichen Ergebnissen des Forschungsvorhabens zu Protokoll zu geben. Konkrete Personen oder Organisationen werden dabei jedoch nicht benannt.

Teilnehmer

- ▶ Hersteller, Industrie, Verbände: 5 Teilnehmer
- ▶ Erstbehandlung, Recycling, Reparatur: 5 Teilnehmer
- ▶ NGOs: 2 Teilnehmer
- ▶ Wissenschaft: 9 Teilnehmer
- ▶ Behörden, Ministerien: 6 Teilnehmer

### 9.4.1 Designanforderungen an Smartphones

#### Zusammenfassung der Diskussionen und generelles Feedback

- ▶ Positive und negative Kritik zu den Anforderungen an Smartphones war zahlenmäßig ausgeglichen. Es gab deutlich mehr Feedback seitens der Hersteller im Vergleich zu den Akteuren der Recyclingkette.
- ▶ Es bestand Erläuterungsbedarf zu den Anforderungen 8 - 10, die jeweils die Entnehmbarkeit und/oder Austauschbarkeit von Batterien und Akkumulatoren adressieren. Wie im Bericht eingehender dargestellt, adressiert Anforderung 8 die Entnehmbarkeit im End-of-Life (EoL) und die Austauschbarkeit in der Nutzungsphase, während die Anforderung 9 als alternative Anforderungsoption lediglich die Entnehmbarkeit im EoL fordert. Anforderung 10 macht generelle Vorgaben zum Einsatz (un)lösbarer Verbindungstechniken mit dem Fokus auf Entnehmbarkeit bestimmter Komponenten im EoL und Reparierbarkeit als „Beifang“ (da nicht im Fokus des Forschungsvorhabens).

#### Software-Obsoleszenz

- ▶ Seitens einer Behörde wurde angemerkt, dass Smartphones heute stark über Software definiert sind, was die Thematik sehr wichtig macht. Es bedarf besserer Information an die Nutzenden, was ein Update beinhaltet. Ist es sicherheitsrelevant? Kann mein Gerät durch das Update an Performance einbüßen? Eine Entscheidungsmöglichkeit für die Nutzenden wäre wünschenswert.
- ▶ Seitens einer Behörde wurde weiterhin angemerkt, dass ein mangelndes Vertrauen in den Löschvorgang von Nutzerdaten eine Problematik darstellt, die eine Weiternutzung außerhalb der Familie verhindert. Es bedarf dringend eines garantierten Löschrprozesses, der den Nutzenden zur Verfügung steht. Seitens der Praxis wurde angemerkt, dass das Löschen durch Einsatz zertifizierter Software bereits gut funktioniert. Ein Problem in der Praxis ist jedoch, wenn Konten von vorherigen Besitzern nicht freigegeben werden und es daher keinen Zugang zum Smart-

phone gibt. Eine Antwort darauf merkt an, dass der Prozess zur sicheren Datenlöschung Nutzenden selbst zur Verfügung stehen (per „Knopfdruck“) und nicht Spezialisten vorbehalten sein soll.

### **Glasbruch**

- ▶ Ein Hersteller merkt an, dass das eingesetzte Glas (Frontglas und Rückseite) als solches langlebig und bruchsicher sein sollte und dass dann kein zusätzlicher Schutz (Sicherheitsglas und Schutzhülle) benötigt wird. Dem Gerät beim Verkauf beigelegtes Zubehör wird u.U. von Nutzenden nicht angenommen, womit die Anforderung kontraproduktiv zur Ressourcenschonung sein kann. Diese Ansichten werden seitens Behörden bestätigt. Es wird auch davon ausgegangen, dass Nutzer mehrheitlich eine individuelle Schutzhülle auswählen wollen.

### **Einfluss des Nutzers auf die Laderate**

- ▶ Ein Hersteller stellt die Frage, ob die Nutzenden die Laderate beeinflussen können muss, oder ob Software nicht selbst sinnvoll eingreifen kann (z.B. Schnellladung tagsüber und langsames Laden über Nacht, um den Akku zu schonen). Seitens Behörden wird eingewandt, dass Nutzende, die ihren Akku schonend laden wollen, dies auch selbst entscheiden können sollen. Andernfalls sollte der schonende Ladevorgang die Standardeinstellung sein. Der Nutzende müsste sich dann aktiv für eine Schnellladung entscheiden, falls gewünscht. Weiterhin sollen den Nutzenden Informationen über den Gesundheitszustand des Akkus verfügbar gemacht werden.

### **Entnehmbarkeit (und Austauschbarkeit) von Akkumulatoren**

- ▶ Ein Hersteller stellt heraus, dass der Fokus der Diskussion auf die Entnehmbarkeit der Akkumulatoren so interpretiert werden kann, dass Akkus als hoch-anfällige Komponenten identifiziert wurden. Akkus sind jedoch heute bereits wesentlich langlebiger als noch vor einigen Jahren. Die Schwerpunktsetzung der Anforderungen auf die Entnehmbarkeit der Akkus ist daher nicht nachvollziehbar. Wenn die Entnehmbarkeit im Sinne der vorgestellten Anforderung (insb. manuelle Entnahme ohne Werkzeug) im EU Recht verankert werden sollte, eröffnet sich für das Thema „Fake-Akkus“ ein großer Spielraum, mit den damit verbundenen Sicherheitsrisiken für die Nutzer.
- ▶ Ein weiterer Hersteller merkt an, dass es auf EU Ebene die Überlegung gibt, die Entnehmbarkeit zu regeln, wenn Akkus unter einem gewissen Wert der Zyklenfestigkeit liegen. Dies wird als bessere Möglichkeit gesehen.
- ▶ Der Auftragnehmer merkt zu den obigen Argumenten an, dass das Thema der Entnehmbarkeit von Akkus insbesondere vor dem Hintergrund der Separierung und einem fachgerechten Recycling als besonders wichtig erachtet wird. Es besteht die gesetzliche Notwendigkeit einer Entnehmbarkeit. Ist die zerstörungsfreie Möglichkeit der Akku-Entnahme gegeben, hat das ebenfalls einen positiven Effekt auf eine mögliche Weiterverwendung des Geräts. Muss das Gerät für die Entnahme zerstört werden, ist die Recyclingfrage anders zu bewerten. Ein Unternehmen aus dem Bereich Refurbishment pflichtet dem bei und ergänzt, dass schon der Transport von akkubetriebenen Geräten hoch problematisch sei. Fest verbaute Akkus sind ein Problem und eine entsprechende Regulierung wäre wünschenswert.

### **Ersatzteile / Lagerhaltung**

- ▶ Von Behördenseite wird ein Spannungsfeld zwischen Verfügbarkeit der Ersatzteile und Lagerhaltung gesehen. Es ist demnach zu berücksichtigen, in welchem Zeitraum Ersatzteile verfügbar sein müssen. Hier kann es potentiell zur Überproduktion und anschließendem Verschrotten nicht abgerufener Ersatzteile kommen, was aus Sicht der Ressourcenschonung als negativ

zu bewerten ist. Eine weitere Behörde wirft ein, dass in diesem Zuge auch die Standardisierung von Komponenten ein Thema sein sollte. Wenn bspw. mehrere Smartphones den gleichen Akkumulator verwenden können, wäre die Lagerhaltung einfacher.

#### **9.4.2 Designanforderungen an Notebooks**

##### **Zusammenfassung der Diskussionen und generelles Feedback**

- ▶ Positive und negative Kritik waren relativ ausgeglichen, mit insgesamt mehr zustimmenden als ablehnenden Kommentaren.
- ▶ Die Thematik Werkzeug und Spezialwerkzeug führte zu einigen Kommentaren. Hier muss der Adressat definiert werden, z.B. der Konsument oder ein zertifizierter Reparaturbetrieb. Auf der einen Seite gibt von Seiten der Zivilgesellschaft den Trend, Nutzenden Reparaturen an ihren Geräten wieder zu ermöglichen. Andererseits sind aktuelle Geräte heute so gebaut, dass Nutzende quasi keine Reparaturen mehr vornehmen können, weil ihnen Werkzeug fehlt und umfangreiches Wissen und bestimmte Fähigkeiten vorausgesetzt werden.
- ▶ Die Anforderung an die Vereinheitlichung verwendeter Schraubentypen wurde kontrovers diskutiert. Es gab Zustimmung als auch Ablehnung.
- ▶ Die Entnehmbarkeit von Komponenten zur Wiederverwendung wurde als wichtig gesehen, insb. bei Computern und Notebooks.

##### **Werkstoffauswahl bei Kunststoffgehäusen**

- ▶ Bei Kunststoffbauteilen werden Forderungen teilweise an ein Mindestgewicht von 25 Gramm gekoppelt. Eine Behörde merkt an, dass dies für Marktüberwachungsorganisationen nur schwer zu prüfen ist. Bei besonders großen Bauteilen ist die Prüfung noch einfach durchführbar, aber bei kleinen Bauteilen nur schwer umsetzbar. Die Auftragnehmer antworten darauf, dass die Gewichtsangabe von 25 Gramm sich auch in den Anforderungen einiger Umweltzeichen durchgesetzt hat. Es wird davon ausgegangen, dass die 25 Gramm tatsächlich willkürlich festgelegt wurden, aber als praktisches Abschneidekriterium dienen können, auch, um die Hersteller zu entlasten.

##### **Entnehmbarkeit von Komponenten für die Wiederverwendung**

- ▶ Ein Notebook oder PC nur für die Ersatzteilgewinnung manuell zu zerlegen macht nach Ansicht der anwesenden Akteure der Recyclingkette keinen Sinn. In der Recyclingpraxis findet eine manuelle Demontage aus Kostengründen in der Masse nicht statt. Eine Behörde räumt ein, dass nicht alles händisch zerlegt werden kann, jedoch belegt ist, dass die Rückgewinnungsraten von Edel- und Sondermetallen bei händischer Vordemontage höher sind als bei rein mechanischen Prozessen. Aus Umweltsicht ist eine manuelle Demontage und Demontagefähigkeit von Geräten daher sinnvoll. Dahingehend wird es als wichtig erachtet, dass die Erstbehandlungsanlagen bei der Demontage nicht zwischen vielen Werkzeugtypen hin und her wechseln müssen.
- ▶ Es stellt sich nach Aussage eines Herstellers die Frage nach der Wahrscheinlichkeit, dass aus einem sieben Jahre alten Notebook noch Komponenten wiederverwendet werden, insb. für die Verwendung in einem neuen Gerät. Bei hochwertigen, langlebigen und in gewissem Grade standardisierten Produktgruppen, wie Servern, wird dieses Szenario beispielsweise als realistisch betrachtet, bei vielen anderen Produktgruppen jedoch angezweifelt.
- ▶ Für die Wiederaufbereitung von Geräten macht die Ersatzteileentnahme aus Sicht einer Erstbehandlungsanlage durchaus Sinn. Ersatzteile müssen sonst am Markt sehr teuer eingekauft werden.

## **Standardisierung der verwendeten Schraubkopfantriebe**

- ▶ Die Vereinheitlichung von Schraubenköpfen macht laut Herstellerposition wenig Sinn. Nur die wenigsten Nutzer reparieren ihr Notebook selbst und professionelle Reparateure verfügen ohnehin über das entsprechende Werkzeug.

### **9.4.3 Designanforderungen an Schreibtischdrucker**

#### **Zusammenfassung der Diskussionen und generelles Feedback**

- ▶ Bei Druckern waren die Diskussionen im Vergleich zu anderen Produktgruppen etwas weniger rege. Die Gründe dafür sind vielschichtig, u.a., da bei Druckern durch die freiwillige Selbstverpflichtung der Hersteller unter der Ökodesign-Richtlinie schon einige ökologische Designaspekte umgesetzt wurden, worüber in anderen Produktgruppen noch gestritten wird.
- ▶ Auch der Einsatz von PCR-Kunststoffen ist bei Druckern schon teilweise umgesetzt.

#### **Werkstoffauswahl bei Kunststoffgehäusen von Tintenstrahldruckern**

- ▶ Seitens eines Unternehmens der Recommerce-Branche wurde erläutert, dass bei der Kunststoffkennzeichnung nicht nur das Basispolymer, sondern auch die Additive in den Kunststoffen zu beachten sind. Dort ist die Kennzeichnung oftmals nicht detailliert genug.
- ▶ Ein Hersteller merkt an, dass eine genaue Definition benötigt wird, was eigentlich Gehäuseteile sind. Nur solche, die die Außenseite des Gerätes darstellen? Auch interne Kunststoffteile?

#### **Software-Obsoleszenz bei Druckern**

- ▶ Ein Hersteller merkt an, dass nicht von einer Treiberproblematik gesprochen werden kann, da diese zehn Jahre und mehr nach Markteinführung eines Gerätes zur Verfügung stehen.
- ▶ Der Auftraggeber stellt die Frage in den Raum, ob jedoch der Aufwand betrieben wird, für alte Druckergeräte seitens der Hersteller Treiber immer auch für neue Betriebssysteme anzupassen.

#### **Wiederaufbereitungs- und Recyclingfähigkeit**

- ▶ Ein Akteur aus der Recyclingkette merkt an, dass die Wiederaufbereitung bei Druckern schwierig ist. Weiterhin haben Drucker als Altgeräte einen vergleichsweise geringen ökonomischen Wert. Eine Reparierbarkeit ist bei Tintenstrahldruckern praktisch nicht gegeben.
- ▶ Für die Hersteller stellt sich die Frage, was eigentlich aus Umweltsicht der Vorteil ist, nur einen Gehäusekunststoff zu verwenden, anstatt zwei. Der Auftragnehmer antwortet, dass eine Reduzierung der Gehäusekunststoffe zu größeren Mengen recyclingfähiger Kunststoffe im Recycling führt. Allerdings ließen sich die Effekte auf das Gesamtsystem in diesem Vorhaben nicht tiefergehend untersuchen, hier könnte eine weitere Studie sinnvoll sein.

#### **Diskussion zur „Vorreiterrolle“ der Drucker-Branche im Bereich Ökodesign**

- ▶ Ein Hersteller erläutert, dass die Änderungen im Produktdesign hinsichtlich eingesetzter Kunststoffe insb. auf die freiwillige Selbstverpflichtung der Hersteller zurückzuführen sind. Auch beim Thema Kennzeichnung hat die Druckerbranche viel erreicht, jedoch wird hier der Nutzen der Kennzeichnung für die Materialsortierung angezweifelt, da i.d.R. Drucker im EoL zunächst mechanisch zerkleinert werden.
- ▶ Ein weiterer Hersteller stellt die Fortschrittlichkeit der Drucker-Branche gegenüber anderen Produktgruppen in Frage. Es muss beachtet werden, dass die Unterschiede bei den Produktgruppen immens sind. Notebooks und Smartphones sind bspw. extrem miniaturisiert worden, haben an Funktionsvielfalt zugenommen und haben ein enormes Innovationstempo vorgelegt. Bei Druckern hingegen ist die Leiterplattentechnologie noch die gleiche wie vor 20 Jahren,

groß in den Abmessungen und vergleichsweise günstig zu produzieren. Es besteht der Zweifel, ob Drucker wirklich eine gute Produktgruppe sind, um sie hinsichtlich ihrer ökologischen Vorreiterrolle mit anderen Produktgruppen zu vergleichen.

#### **9.4.4 Designanforderungen an Flachbildschirmfernseher**

##### **Zusammenfassung der Diskussionen und generelles Feedback**

- ▶ Bei den Fernsehern war die Diskussion ähnlich zu Druckern verhältnismäßig unaufgeregt.
- ▶ Es ging oftmals um die Materialauswahl bei den Rückwänden sowie die Ausweitung der Materialanforderung auf die Standfüße der Fernseher.
- ▶ Positives Feedback zur Anforderung an die Upgradefähigkeit gab es von Seiten zivilgesellschaftlicher Vertreter. Aus der Recommerce-Branche kam die Diskussion, ob es möglich wäre, eine Art Leerstellenlösung vorzuhalten. Bei zukünftigem Bedarf könnten bspw. Steckkarten nachgerüstet werden.
- ▶ Ein ablehnender Kommentar von einem Hersteller, dass Kunden keine modularen Fernseher möchten.

##### **Standardisierung der verwendeten Schraubkopfantriebe**

- ▶ Laut Aussage eines Recyclers ist es im Recyclingprozess irrelevant, mit welchem Schraubkopfantrieb ein Fernseher versehen ist. Die teilweise automatisierten Anlagen lösen keine Schrauben, sondern fräsen die Geräte auf. Für die Geräte, die für die Wiederverwendung und/oder Ersatzteilebeschaffung vorgesehen sind, ist es aber natürlich ein Thema.

##### **Modularität**

- ▶ Es gab eine Diskussion zu externen Netzteilen und dass der Konsument laut der Hersteller keine externen Netzteile wünscht. Auch ein Behördenvertreter gab zu bedenken, dass die Nutzenden keine Lust auf externe Netzteile hätten. Zudem müssten Verbraucher geschult werden, dass zukünftig auch Fernseher über ein externes Netzteil verfügen. Es ist fraglich, ob die Nutzenden bei einem Defekt des Fernsehers tatsächlich prüfen, ob das Netzteil die Ursache ist und dieses eigenständig austauschen.

#### **9.4.5 Anforderungen an Gerätebatterien**

##### **Zusammenfassung der Diskussionen und generelles Feedback**

- ▶ Insgesamt überwiegt die Anzahl der positiven Kommentare leicht.
- ▶ Einige Teilnehmer hinterfragten, warum die zerstörungsfreie Entnahme von Batterien bzw. Akkus wichtig sei. Weiterhin wurde hinterfragt, wie der Zeitrahmen für die Demontage (20 Sekunden) festgelegt wurde.
- ▶ Einige positive Kommentare beziehen sich auf die Handlungsempfehlung zur Auslesbarkeit des Gesundheitszustands von Geräteakkumulatoren. Auch wurde eine Gesundheitszustandsermittlung des Gesamtgerätes diskutiert.

##### **Entnehmbarkeit von Gerätebatterien**

- ▶ Es wurde breit diskutiert, ob eine Anforderung an die Kennzeichnung von Geräten sinnvoll wäre, die deutlich macht, welche Geräte mit Batterien oder Akkumulatoren betrieben werden. Im EoL wird es zunehmend schwieriger zu erkennen, welche Geräte akkubetrieben sind.
- ▶ Die chemische Zusammensetzung der Batterie sollte ebenfalls gekennzeichnet werden, um diese sortenrein trennen zu können.

## Strategie zur Optimierung der Batterielebensdauer

- ▶ Eine Behörde merkt an, dass Nutzende die geforderte Beschreibung der Hersteller zur Strategie zur Lebensdauerverlängerung von Akkus ggf. nicht verstehen. Wenn die Umsetzung sehr generell erfolgt, und Hersteller bspw. angeben, besonders langlebige Batterien zu verwenden, ist der Vorteil dieser Anforderung fraglich. Aus Behördensicht müsste die Anforderung daher ins Detail gehen, was jedoch auch schwierig sein kann.

### 9.4.6 Produktübergreifende Anforderungen

#### Zusammenfassung der Diskussionen und generelles Feedback

- ▶ Hier ging es in den Diskussionen und Kommentaren um die Schärfe der Details sowie Verständnisfragen zu einzelnen Formulierungen.
- ▶ Es gab mehrere Kommentare zur Beachtung der Norm prEN 45557:2019.64
- ▶ Es besteht die Forderung seitens einer Behörde, den Akku mit in die Garantie und Gewährleistung aufzunehmen.

### Recyclingfähigkeit von Gehäusewerkstoffen

- ▶ In der Anforderung wird gefordert, Kunststoffrezyklat aus Post-Consumer Elektro(nik)altgeräten (EAG) zu verwenden. Ein Hersteller machte deutlich, dass es der Umweltgesetzgebung um das Ziel des Einsatzes von PCR-Kunststoffen an sich gehen müsse, wobei die Quelle des Rezyklats zweitrangig sein sollte. Der Auftragnehmer merkt dazu an, dass es im Wesentlichen darum geht, dass Kunststoffrezyklate aus EAG möglichst wieder in hochwertigen Anwendungen eingesetzt werden und Downcycling möglichst vermieden wird.
- ▶ Eine Behörde merkt an, dass es in der Normung es eine ähnliche Diskussion gibt. Es müssten die ökologischen Rücksäcke der einzelnen Materialien zur Verfügung stehen, um ökologische Bilanzen berechnen zu können. Zudem müssen die Daten einheitlich bestimmt werden und bspw. von der Kommission kommen. Wenn dann auch Upcycling und Downcycling mitberücksichtigt wird, dann wäre die Gesamtdiskussion einen riesigen Schritt weiter.

### Vereinheitlichung von Werkzeugen und Schraubentypen

- ▶ In einer Anforderung empfiehlt der Auftragnehmer, Schraubenköpfe für eine gesamte Produkt- oder sogar Sammelgruppe zu vereinheitlichen. Auf Ebene einer Sammelgruppe wird dies aufgrund des breiten Spektrums an Produktgruppen in einer Sammelgruppe als unrealistisch betrachtet. Bei einer Demontage durch Maschinen sollten verschiedene Schraubenköpfe unproblematisch sein, da Werkzeuge sehr rasch gewechselt werden können.
- ▶ Ein Behördenvertreter stellt die Gegenfrage, was eigentlich gegen eine Vereinheitlichung spreche - dann gäbe es eben nur noch Kreuzschlitzschrauben (beispielhaft). Für den Sicherheitsaspekt könnte auch versucht werden, sich auf einen speziellen Schraubentyp festzulegen, damit der Nutzer ein Gerät nicht selbst öffnen kann.

### 9.4.7 Weitere Stellungnahmen zu diversen Themen

- ▶ Es wurde kritisch angemerkt, dass die Formulierungen der Anforderungen nicht eindeutig zwischen Recycling und Nutzungsphase unterscheiden und damit das Ziel der Anforderungen oft nicht klar sei. Der Auftragnehmer antwortet, dass die Unterscheidung im Bericht deutlicher ist, als es auf den Postern mit den Anforderungen umgesetzt wurde.

---

<sup>64</sup> „General method for assessing the proportion of recycled material content in energy related products“

- ▶ Insb. im Normungsmandat M/543 werden aktuell Aspekte diskutiert, die große Überschneidung mit den hier diskutierten Anforderungen haben. Hier fehlte der Bezug.
- ▶ Ein Behördenvertreter argumentiert, dass ein europaweites Abfallrecht benötigt wird sowie eine Monitoringstelle, die Stoffstrombilanzen erstellen kann.
- ▶ Ein Unternehmen aus der Recyclingbranche kritisiert die Regelung, Haushaltsgeräte über die Kantenlänge von 50 cm bei der Sammlung zu unterscheiden. Es wird erwartet, dass Geräte der gleichen Produktgruppe so in zwei verschiedenen Sammelgruppen auftauchen. Damit steigt der Sortieraufwand in der Erstbehandlungsanlage potentiell erheblich an.
- ▶ Ein Recyclingunternehmen trifft die Aussage, dass es natürlich gerne gesehen werden würde, wenn das Produktdesign bspw. die einfache Entnahme von Leiterplatten ermöglicht, da dies für die Rückgewinnungsprozesse sehr vorteilhaft wäre. Auch das Thema einzelne Bauteile manuell zu zerlegen wird häufig diskutiert. Es gibt aktuell jedoch keine Prozesse und Verfahren, mit denen dies wirtschaftlich umgesetzt werden kann.
- ▶ Ein Akteur aus dem stofflichen Recycling benannte die Regulierung von POP als problematisches Thema, da diese dem stofflichen Recycling im Wege steht. Kunststoffe werden bspw. aufgrund von Schadstoffgehalten zwangsweise vernichtet. Dieses Thema wurde in der Studie nicht betrachtet.