



VDI ZRE Publikationen: Kurzanalyse Nr. 33

# Ressourceneffizienz durch innovative Recyclingtechnologien und -verfahren



VDI ZRE Kurzanalyse Nr. 33: Ressourceneffizienz durch innovative Recyclingtechnologien und -verfahren

Autorin:

Dr.-Ing. Ulrike Lange, VDI Zentrum Ressourceneffizienz

Wir danken Frau Prof. Dr.-Ing. habil. Christina Dornack, Institutsdirektorin des Instituts für Abfall- und Kreislaufwirtschaft der Technischen Universität Dresden, für ihre fachliche Unterstützung.

Die Kurzanalyse wurde im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz erstellt.

Die Kurzanalysen des VDI ZRE geben einen Überblick über aktuelle Entwicklungen des Themas Ressourceneffizienz in Forschung und industrieller Praxis. Sie enthalten eine Zusammenstellung relevanter Forschungsergebnisse, neuer Technologien und Prozesse sowie Gute-Praxis-Beispiele. Damit verschaffen die Kurzanalysen einem breiten Publikum aus Wirtschaft, Forschung und Verwaltung einen Einstieg in ausgewählte Themenfelder der Ressourceneffizienz.

Redaktion:

VDI Technologiezentrum GmbH  
VDI-Platz 1  
40468 Düsseldorf

Tel. +49 30-27 59 506-0  
zre-info@vdi.de  
www.ressource-deutschland.de

Titelbild: © PantherMedia / Romaset (bearbeitet)

Gedruckt auf umweltfreundlichem Recyclingpapier.

VDI ZRE Publikationen:  
Kurzanalyse Nr. 33

Ressourceneffizienz durch innovative  
Recyclingtechnologien und -verfahren



# INHALTSVERZEICHNIS

ABBILDUNGSVERZEICHNIS	5
TABELLENVERZEICHNIS	6
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	7
TEIL 1: KURZANALYSE	10
1 EINLEITUNG	11
2 KUNSTSTOFFE	14
2.1 Herausforderungen des Kunststoffmarkts	14
2.1.1 Aktuelle Recyclingsituation	14
2.1.2 Gesetzliche Herausforderungen	17
2.1.3 Herausforderungen in der Praxis	19
2.2 Stand der Technik	25
2.3 Innovative Recyclingtechnologien	28
2.3.1 Sortierung von Kunststoffwertstoffen	28
2.3.2 Verwertung zu Kunststoffrezyklaten	35
2.3.3 Verwertungstechnologien auf biologischer Basis	38
3 BATTERIEN UND AKKUMULATOREN	40
3.1 Herausforderungen im Batterierecycling	40
3.1.1 Aktuelle Recyclingsituation	40
3.1.2 Gesetzliche Herausforderungen	42
3.1.3 Herausforderungen in der Praxis	44
3.2 Stand der Technik	52
3.3 Innovative Recyclingtechnologien	54
3.3.1 Demontage von Batterien und Akkumulatoren	55
3.3.2 Recycling von Batterien und Akkumulatoren	57
4 ELEKTRO- UND ELEKTRONIK-ALTGERÄTE	64
4.1 Herausforderungen im Recycling von Elektro- und Elektronik-Altgeräten	64
4.1.1 Aktuelle Recyclingsituation	64
4.1.2 Gesetzliche Herausforderungen	65

4.1.3	Herausforderungen in der Praxis	67
4.2	Stand der Technik	72
4.3	Innovative Recyclingtechnologien	75
5	PHOTOVOLTAIK-MODULE	79
5.1	Herausforderungen im Recycling von PV-Modulen	79
5.1.1	Aktuelle Recyclingsituation	79
5.1.2	Gesetzliche Herausforderungen	81
5.1.3	Herausforderungen in der Praxis	82
5.2	Stand der Technik	84
5.3	Innovative Recyclingtechnologien für PV-Module	87
6	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	91
	TEIL 2: FACHGESPRÄCH	93
7	ERGEBNISSE DES FACHGESPRÄCHS	94
7.1	Programm	94
7.2	Einführung	95
7.3	Mengenentwicklung von neuen Industriebatterien	95
7.4	Regulatorische Entwicklungen für Industriebatterien	96
7.5	Entwicklungen des Recyclingmarkts	98
7.5.1	Entwicklung von Recyclingkapazitäten	98
7.5.2	Entwicklung von Recyclingmengen und Zusammen- setzung	99
7.5.3	Abschätzung von Investitionsbedarfen	100
7.5.4	Innovative Recyclingtechnologien	100
7.5.5	Einsatz von Sekundärrohstoffen aus dem Batterie- recycling	102
7.6	Zusammenfassung	102
	LITERATURVERZEICHNIS	103

---

## ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Stoffstrom Kunststoffe Deutschland 2021 (eigene Darstellung)	16
Abbildung 2: Europäische und nationale Regelungen zum Umgang mit Kunststoffen (eigene Darstellung)	18
Abbildung 3: Agierende der Wertschöpfungskette Kunststoffe	20
Abbildung 4: Erfassung und Sortierung von Abfällen (eigene Darstellung)	26
Abbildung 5: Werkstoffliche Verwertung (eigene Darstellung)	27
Abbildung 6: Nachfrageentwicklung von Lithium-Ionen-Batterien in Europa	42
Abbildung 7: Prozessvariationen Batterierecycling	53
Abbildung 8: Schematische mechanische Behandlung von Elektro- Altgeräten (eigene Darstellung)	73
Abbildung 9: Rückgewinnung von Leiterplatten (eigene Darstellung)	74
Abbildung 10: Zusammensetzung von PV-Modulen der verschiedenen Generationen	83
Abbildung 11: Mechanische Behandlung von siliziumbasierten PV- Modulen (eigene Darstellung)	86

**TABELLENVERZEICHNIS**

Tabelle 1:	Aufkommen von Kunststoffabfällen in Deutschland 2021	15
Tabelle 2:	Ausbeute aus der Sortierung je Stofffraktion	26
Tabelle 3:	Sortierergergebnisse der Anwendung der digitalen Wassermarke	32
Tabelle 4:	Auswahl an Projekten zu innovativen Recycling-technologien für Kunststoffe	37
Tabelle 5:	Menge an Altbatterien, die einer Verwertung zugeführt werden (alle Batteriearten, u. a. Geräte-, Fahrzeug- und Industriebatterien)	41
Tabelle 6:	Bedarf, Reserven und Ressourcen von Lithium und Kobalt	45
Tabelle 7:	Rohstoffkritikalität von Lithium, Nickel und Kobalt nach VDI 4800, Blatt 2	46
Tabelle 8:	Zurückgewonnene Materialien aus dem Batterie-recycling	51
Tabelle 9:	Innovative Entwicklungen im Batterierecycling	62
Tabelle 10:	Aufkommen von Elektro- und Elektronikgeräten sowie gesammelte EAG	64
Tabelle 11:	Verwertungsquote VzWV und Recycling	65
Tabelle 12:	Stand der Rückgewinnungstechnologien für Metalle aus Post-Consumer-Altprodukten	71
Tabelle 13:	In Verkehr gebrachte Mengen an Photovoltaikmodulen	80
Tabelle 14:	Mengenentwicklung von PV-Modulen (2017 bis 2020)	80
Tabelle 15:	Prognose der PV-Modulmengen zur Entsorgung bis 2050	83



---

**ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS**

<b>ADR</b>	Übereinkommen über die internationale Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße
<b>ABS</b>	Acrylnitril-Butadien-Styrol
<b>AlMn</b>	Alkali-Mangan
<b>AR</b>	Argon
<b>a-Si</b>	Amorphes Silizium
<b>BMUV</b>	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz
<b>CdTe</b>	Cadmiumtellurid
<b>CIGS</b>	Kupfer-Indium-Gallium-Diselenid
<b>CIS</b>	Kupfer-Indium-Selen
<b>CO<sub>2</sub></b>	Kohlenstoffdioxid
<b>CO<sub>2äq</sub></b>	Kohlenstoffdioxid-Äquivalente
<b>c-Si</b>	Kristallines Silizium
<b>DIN</b>	Deutsches Institut für Normung e.V.
<b>DIN SPEC</b>	Konsortialstandard
<b>EAG</b>	Elektro-Altgerät
<b>EBS</b>	Ersatzbrennstoff
<b>ETS</b>	Emission Trading System
<b>EuRIC</b>	The European Recycling Industries' Confederation
<b>EVA</b>	Ethylenvinylacetat

<b>Gew.-%</b>	Gewichtsprozent
<b>GDSN</b>	Global Data Synchronisation Network
<b>HDPE</b>	High Density Polyethylen
<b>HSI</b>	Hyper Spectral Imaging Technologie
<b>KI</b>	Künstliche Intelligenz
<b>KMU</b>	Kleine und mittlere Unternehmen
<b>LAGA</b>	Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall
<b>LCC</b>	Leaf-Branch Compost Cutinase
<b>LCD</b>	Flüssigkristallanzeige
<b>LDPE</b>	Low Density Polyethylen
<b>LFP</b>	Lithiumeisenphosphat
<b>Li-Ion</b>	Lithium-Ionen
<b>LVP</b>	Leichtverpackungen
<b>MEG</b>	Monoethylenglykol
<b>MVA</b>	Müllverbrennungsanlage
<b>NIR</b>	Nahinfrarot-Spektroskopie
<b>Ni-Cd</b>	Nickel-Cadmium
<b>Ni-Mh</b>	Nickel-Metallhydrid
<b>NMC</b>	Nickel-Mangan-Kobalt
<b>PA</b>	Polyamid
<b>PE</b>	Polyethylen

---

<b>PERC</b>	Passivated Emitter Rear Cell
<b>PET</b>	Polyethylenterphthalat
<b>PP</b>	Polypropylen
<b>PPK</b>	Papier, Pappe, Karton
<b>PS</b>	Polysterol
<b>PU</b>	Polyurethan
<b>PV</b>	Photovoltaik
<b>PVC</b>	Polyvenylchlorid
<b>RQ</b>	Recyclingquote
<b>SKU</b>	Lagerhaltungseinheit
<b>EAR</b>	Elektro-Altgeräte Register
<b>SX</b>	Solventextraktion
<b>t</b>	Tonnen
<b>TBS</b>	Tracer Based Sorting
<b>TRL</b>	Technical Readiness Level
<b>UV</b>	Ultraviolett
<b>VDI</b>	Verein Deutscher Ingenieure e.V.
<b>VDI ZRE</b>	VDI Zentrum Ressourceneffizienz
<b>VzWV</b>	Vorbereitung zur Wiederverwendung
<b>WEEE</b>	Waste electric and electronic equipment
<b>ZnC</b>	Zink-Kohle

## TEIL 1: KURZANALYSE

## 1 EINLEITUNG

Ressourceneffizienz trägt maßgeblich dazu bei, natürliche Ressourcen zu schonen. Dazu braucht es nicht nur punktuelle Maßnahmen, sondern eine nachhaltige und umfassende Transformation der Wirtschaftsweise. Nur auf diese Weise kann sichergestellt werden, dass ausreichend Ressourcen auch für künftige Generationen bereitgestellt werden.

Das Konzept des zirkulären Wirtschaftens ist der Grundpfeiler dieser Transformation. Die Kreislaufwirtschaft im weiteren Sinne bzw. die sogenannte Circular Economy beschreibt dabei ein Produktions- und Konsummodell, in dem Produkte und Materialien so lange wie möglich im Wirtschaftskreislauf geführt werden. Strategien wie die Reparatur, die Wiederverwendung, die Aufarbeitung, das Recycling und das Leasing verlängern und intensivieren die Lebensdauer von Produkten und Materialien und erhalten so die Wertschöpfung.<sup>1</sup>

Ökologische Erfordernisse mit ökonomischen Entwicklungsmöglichkeiten, Innovation und sozialer Verantwortung zu verbinden ist die Leitidee des deutschen Ressourceneffizienzprogramms ProgRess III. Aus diesem Grund legt es u. a. Programmpunkte zum Schutz natürlicher Ressourcen fest. Hierzu zählen neben einer verantwortungsvollen Rohstoffversorgung auch ressourcenschonend gestaltete Produkte, eine ressourceneffiziente Produktion, ein nachhaltiger Lebensstil und Konsum sowie die Vermeidung und Verminderung von Abfallmengen und Schadstoffanreicherungen. Ressourceneffizienz zielt somit auf die Vermeidung von unnötigem Material- und Energieeinsatz ab.<sup>2</sup>

Das Ziel einer ressourceneffizienten Kreislaufwirtschaft ist es folglich, den Rohstoffeinsatz zu minimieren und Stoffströme so weit zu verringern, dass mit der aktuellen Wirtschaftsweise die planetaren Grenzen eingehalten werden. Dieser Anspruch beinhaltet zugleich, die nicht vermeidbaren, notwen-

---

<sup>1</sup> Vgl. Europäisches Parlament (2022).

<sup>2</sup> Vgl. Bundesregierung der Bundesrepublik Deutschland (2020).

digen Rohstoffe so lange wie möglich zu nutzen und sie in einem weitestgehend geschlossenen Kreislauf zu führen - unter der Voraussetzung, dass der dafür nötige Aufwand den zu erzielenden Nutzen nicht übersteigt.

Die der Nutzungsintensivierung und der Lebensdauerverlängerung nachgelagerte wesentliche Strategie für die Kreislaufführung ist das Recycling. In Deutschland zählt das Recycling zur Abfallbewirtschaftung und wird im Kreislaufwirtschaftsgesetz als Verwertungsverfahren beschrieben, durch das Abfälle zu Erzeugnissen, Materialien oder Stoffen entweder für den ursprünglichen Zweck oder für andere Zwecke aufbereitet werden.<sup>3</sup> Sammlung, Aufbereitung und Wiedereinsatz der Sekundärrohstoffe funktionieren für klassische Rohstoffe wie Glas oder Stahl bereits sehr gut. Für Materialien und Produkte wie beispielsweise Kunststoffe (vgl. Kapitel 2), Batterien und Akkumulatoren (vgl. Kapitel 3), Elektro-Altgeräte bzw. Edel- und Sondermetalle (vgl. Kapitel 4) oder PV-Module (vgl. Kapitel 5) bedarf es hingegen weiterer Entwicklung, um eine ressourceneffiziente Kreislaufwirtschaft zu etablieren.

Neben diversen Herausforderungen, wie zum Beispiel den hohen Qualitätsanforderungen an Rezyklate oder teils anspruchsvollen und aufwendigen regulatorischen Vorgaben, sind darüber hinaus effizientere Technologien zum optimierten Aufschluss von Wertstoffströmen notwendig.<sup>4</sup> Aus diesem Grund wird aktuell viel Forschungs- und Entwicklungsarbeit geleistet, um sukzessive Ressourceneffizienzpotenziale zu erschließen und den Ausbau einer ressourcenschonenden und ressourceneffizienten Kreislaufwirtschaft weiter voranzubringen.

Die vorliegende Kurzanalyse bietet einen Einblick in den aktuellen Stand der Entwicklung innovativer Recyclingtechnologien und Verwertungsverfahren für die genannten Fraktionen<sup>5</sup>. Ziel ist es, insbesondere kleinen und mittleren Unternehmen (KMU) des verarbeitenden Gewerbes einen Einblick in die

---

<sup>3</sup> Vgl. Absatz (25), § 3 Kreislaufwirtschaftsgesetz, vgl. Bundestag der Bundesrepublik Deutschland (28. Oktober 2020).

<sup>4</sup> Vgl. Lange, U. (2022).

<sup>5</sup> Informationen zu weiteren Fraktionen wie Textilien, Glas, Metall und Papier können der VDI ZRE Materialdatenbank entnommen werden: <https://www.ressource-deutschland.de/werkzeuge/ressourceneffizienz-in-der-praxis/materialdatenbank/>

Abläufe sowie die aktuellen Chancen und Herausforderungen der Entsorgungs- bzw. Recyclingbranche zu geben. Auf diese Weise sollen ein zunehmendes wertschöpfungsstufenübergreifendes Verständnis sowie eine transparente Wahrnehmung der gesamten Wertschöpfungskette kontinuierlich forciert und im Weiteren eine ressourceneffiziente Kreislaufwirtschaft - mitgedacht durch alle Beteiligten - gestärkt werden.

## 2 KUNSTSTOFFE

### 2.1 Herausforderungen des Kunststoffmarkts

Das Kunststoffrecycling befindet sich aktuell im Umbruch. Die Probleme des Kunststoffverbleibs in der Natur führten zu einer Sensibilisierung der Gesellschaft für ihren tagtäglichen Umgang mit Kunststoffen. Die Berichte über die Vermüllung der Meere, über die steigende Akkumulation von Mikroplastik in Natur, Mensch und Tier oder die verbrachten Kunststoffmengen nach Übersee haben den Druck auf die Politik und die Agierenden der Wertschöpfungskette Kunststoffe erhöht.

#### 2.1.1 Aktuelle Recyclingsituation

##### Recyclingquoten

Aktuell liegen die offiziell veröffentlichten **Recyclingquoten für alle Kunststoffabfälle** (stoffliche Verwertung von Produktionsabfällen und Post-Consumer-Abfällen) bei knapp 47 Prozent (Input in erste Recyclinganlage, alte Berechnungsgrundlage, Tabelle 1) bzw. nach neuer Berechnungsmethode des EU-Durchführungsbeschlusses 2019/665 **bei knapp 35 Prozent** (Input in den Prozessschritt der Compoundierung bzw. Verarbeitung). Die ursprüngliche Recyclingquote erhob die Inputmenge in die erste Recyclinganlage. Unberücksichtigt blieb hierbei der Output, der nach der durchgeführten stofflichen Verwertung sowie der Rezyklatherstellung erzeugt wurde. Hier entfallen Mengen auf den Export, die rohstoffliche Verwertung und energetische Verwertung als Ersatzbrennstoff (EBS). Daher erfolgte anhand des EU-Durchführungsbeschlusses 2019/665 eine Anpassung der Berechnungsmethode, die den Input (vorbereitetes Sekundärmaterial) in den Prozessschritt der Compoundierung bzw. Verarbeitung erhebt.

**Produktionsabfälle** liegen sortenreiner und unverschmutzter vor als Post-Consumer-Abfälle. Daher konnte hier ein Anteil von **74 Prozent** der werkstofflichen Verwertung zugeführt werden.

**Post-Consumer-Abfälle** hingegen sind u. a. charakterisiert durch nicht restentleerte Verpackungen, Verpackungsverbünde, verschmutzte Verpackungen und sonstige Fehlwürfe, sodass nur ein Anteil von **rund 45 Prozent** (Input in erste Recyclinganlage) bzw. nach neuem EU-



Durchführungsbeschluss 2019/665 knapp 33 Prozent (Input in den Prozessschritt der Compoundierung bzw. Verarbeitung) stofflich verwertet wurden (vgl. Tabelle 1).

Der überwiegende Teil von 54 Prozent (bzw. rund 66 Prozent entsprechend der neuen Berechnungsmethode des EU-Durchführungsbeschlusses 2019/665) wird energetisch verwertet.<sup>6</sup>

Tabelle 1: Aufkommen von Kunststoffabfällen in Deutschland 2021<sup>7</sup>

	Gesamt-Kunststoffabfälle		Post-Consumer-Abfälle		Abfälle aus Produktion und Verarbeitung	
	Mio. Tonnen	%	Mio. Tonnen	%	Mio. Tonnen	%
Stoffliche Verwertung	2,64	46,6	2,47	45,4	0,17	73,9
davon rohstoffliche Verwertung	0,03	0,5	0,03	0,6	0,00	0,00
davon werkstoffliche Verwertung	2,61	46,0	2,44	44,8	0,17	73,9
Energetische Verwertung	2,99	52,7	2,94	54,0	0,05	21,8
Beseitigung/Deponierung	0,04	0,7	0,03	0,6	0,01	4,3
<b>Abfallaufkommen insgesamt</b>	<b>5,67</b>	<b>100</b>	<b>5,44</b>	<b>100</b>	<b>0,23</b>	<b>100</b>

Werden tatsächlich alle Verluste und anderweitig eingesetzten Outputs berücksichtigt, die auch hinter dem neu gesetzten Berechnungspunkt des EU-Durchführungsbeschlusses 2019/665 auftreten, ergibt sich eine Menge an Kunststoffabfällen von 1,46 Millionen Tonnen, die 2021 werkstofflich verwertet wurden (vgl. Abbildung 1). Das entspricht, bezogen auf die Menge der Post-Consumer-Abfälle, einer **Recyclingquote von 26,8 Prozent**.<sup>8</sup> In den Jahren 2017 bzw. 2019 lag diese noch bei 15,6 Prozent (810.000 Tonnen) bzw. 19,2 Prozent (1,03 Mio. Tonnen).<sup>9, 10</sup> Hier ist ein kontinuierliches Wachstum von 7,6 Prozentpunkten seit 2019 bzw. 11,2 Prozentpunkten seit 2017 zu verzeichnen.

<sup>6</sup> Vgl. Lindner, C. et al. (2022), S. 13.

<sup>7</sup> Vgl. Lindner, C. et al. (2022), S. 18f.

<sup>8</sup> Vgl. Lindner, C. et al. (2022), S. 20.

<sup>9</sup> Vgl. Lindner, C.; Schmitt, J. und Hein, J. (2020), S. 13ff.

<sup>10</sup> Vgl. Arkin, C. et al. (2021), S. 36f.

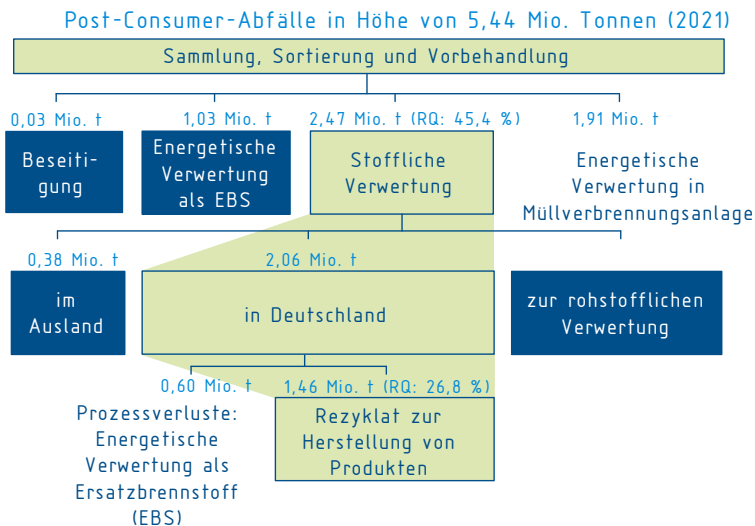


Abbildung 1: Stoffstrom Kunststoffe Deutschland 2021 (eigene Darstellung)<sup>11</sup>

### Exportierte Kunststoffabfälle

Die Menge an **exportierten Kunststoffen** betrug im Jahr 2020 ca. eine Million Tonnen und hat sich im Vergleich zum Jahr 2019 um acht Prozent verringert.<sup>12</sup> Dies entspricht einer Exportquote von ca. 17 Prozent bezogen auf die gesamten Kunststoffabfälle (6,28 Millionen Tonnen) im Jahr 2019. Unter anderem durch Importrestriktionen, die durch China im Jahr 2018 und folgend von weiteren asiatischen Staaten verhängt worden waren, sowie strengere Regelungen im Baseler Abkommen, umgesetzt am 20. Dezember 2020, konnten die Kunststoffexporte im Jahr 2021 erneut gesenkt werden. Diese betragen für das Jahr 2021 rund 766.000 Tonnen, was einer **Exportquote von 13,5 Prozent** entspricht.<sup>13</sup> Neben den genannten Gründen ist der Rückgang auch auf die Corona-Krise und damit einhergehende Unterbrechungen der Lieferketten, aber ebenso auf die gestiegene Inlandsnachfrage nach Rohstoffen zurückzuführen. So blieb der Umsatz durch Exporte trotz des Mengeneinbruchs relativ konstant bei insgesamt ca. 259 Millionen Euro.<sup>14</sup>

<sup>11</sup> Vgl. Lindner, C. et al. (2022), S. 19.

<sup>12</sup> Vgl. Statistisches Bundesamt (2021).

<sup>13</sup> Vgl. Statistisches Bundesamt (2022a).

<sup>14</sup> Vgl. Der Tagesspiegel (2022).

## Einsatz von Kunststoffrezyklaten

Im Jahr 2021 wurden insgesamt 14,04 Millionen Tonnen Kunststoffe verarbeitet. Davon waren 11,75 Millionen Tonnen Neuware. Der **Einsatz von Kunststoffrezyklaten** (1,65 Millionen Tonnen) inklusive der Wiederverwendung von Nebenprodukten (0,64 Millionen Tonnen) belief sich auf ca. 2,29 Millionen Tonnen und entspricht damit einem Anteil von 16,3 Prozent. Im Jahr 2019 lag der Anteil von Kunststoffrezyklaten inklusive der Nebenprodukte noch bei 1,95 Millionen Tonnen mit einem Anteil von 13,7 Prozent.<sup>15</sup> Das bedeutet einen Zuwachs von 340.000 Tonnen. Der darin enthaltene Einsatz von Kunststoffrezyklaten aus Post-Consumer-Abfällen hat sich von 1,02 Millionen Tonnen im Jahr 2019 auf 1,27 Millionen Tonnen im Jahr 2021 erhöht – hierbei handelt es sich um einen Zuwachs von 250.000 Tonnen. Die meisten Kunststoffrezyklate wurden in der Baubranche (40 Prozent), in der Verpackungsindustrie (29 Prozent) sowie in der Landwirtschaft (elf Prozent) verarbeitet.<sup>16</sup>

### 2.1.2 Gesetzliche Herausforderungen

Die **regulatorischen Zielsetzungen** zur Schließung der Kunststoffkreisläufe in der Europäischen Union (EU) und in Deutschland sind hoch. Der EU-Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft von 2015 sowie der neue EU-Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft von 2020, der im Europäischen Green Deal von 2019 angekündigt wurde, forcierten durch umfangreiche Maßnahmenpakete und Richtlinienvorgaben den nachhaltigen Umgang mit Kunststoffen. Die gesetzten Anforderungen reichen dabei von der nachhaltigen Verpackungsgestaltung über das Verbot von Einwegplastik bis hin zur Festlegung eines verbindlichen Rezyklatanteils in bestimmten Kunststoffprodukten. Die Europäische Kunststoffstrategie legt neben weiteren Maßnahmenpaketen u. a. die Umsetzung einer Einwegkunststoffrichtlinie fest, die im Jahr 2019 veröffentlicht wurde und bis 2021 in nationales Recht umzusetzen war.

Auf **nationaler Ebene** veröffentlichte das Deutsche Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV)

---

<sup>15</sup> Vgl. Lindner, C.; Schmitt, J. und Hein, J. (2020), S. 13.

<sup>16</sup> Vgl. Lindner, C. et al. (2022), S 20.

den „5-Punkte-Plan für weniger Plastik und mehr Recycling“<sup>17</sup>. Dieser fordert – ähnlich den europäischen Vorgaben – beispielsweise eine Hochskalierung der Recyclingkapazitäten ebenso wie einen gesteigerten Rezyklateinsatz in Produkten. Die Vorgaben der Europäischen Union wurden in Deutschland durch die Novelle des Kreislaufwirtschaftsgesetzes im Jahr 2020 sowie weitere, teilweise noch laufende Gesetzgebungsverfahren umgesetzt (vgl. Abbildung 2).

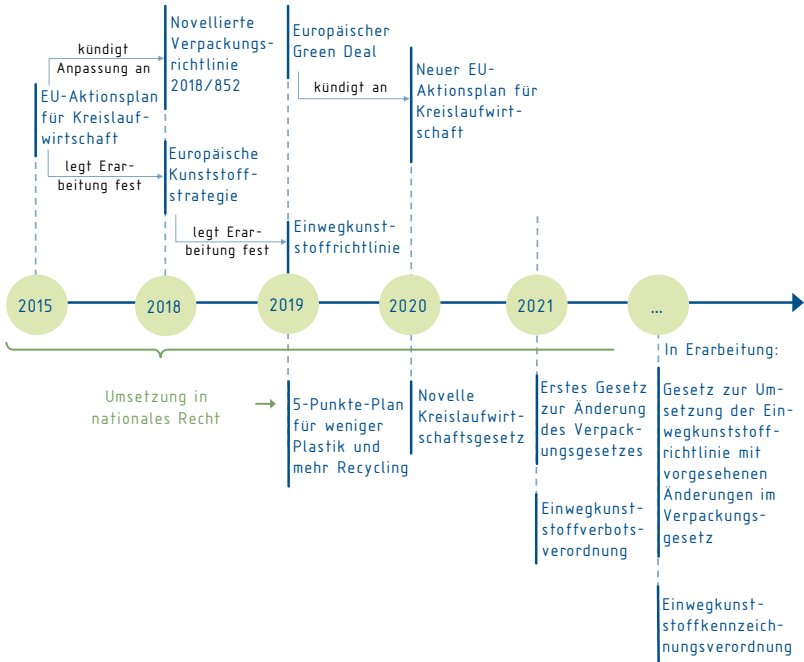


Abbildung 2: Europäische und nationale Regelungen zum Umgang mit Kunststoffen (eigene Darstellung)

Der Auszug der aktuell wichtigsten gesetzlichen Regelungen auf europäischer und nationaler Ebene verdeutlicht den hohen Stellenwert, der dem Umgang mit Kunststoffen beigemessen wird. Die praktische Umsetzung der

<sup>17</sup> Vgl. BMUV (2018).

gesetzlichen Regelungen ist jedoch bürokratisch **anspruchsvoll und aufwendig**. So werden die Vorgaben der Europäischen Union in den Mitgliedsstaaten auf verschiedene Weisen in nationales Recht transferiert. Hierunter fallen beispielsweise unterschiedliche Sammlungs- und Verwertungssysteme, u. a. basierend auf unterschiedlichen Vorgaben an die Verwertungsquoten oder auch unterschiedliche Pfandsysteme.<sup>18, 19</sup>

Auch auf nationaler Ebene sind die gesetzlichen Vorgaben umfangreich und können dabei von Bundesland zu Bundesland variieren. Neben unterschiedlichen Vorgaben in den EU-Mitgliedsstaaten existieren beispielsweise in Deutschland bundesweit uneinheitliche Bedingungen zum Transport vorsortierter Kunststoffabfälle oder im Hinblick auf die Umsetzung und Überwachung der Getrenntsammlung von u. a. Kunststoffabfällen entsprechend der Gewerbeabfallverordnung. Für die oftmals global agierenden Unternehmen bedeutet die **zersplitterte Gesetzgebung** einen hohen Aufwand, sodass ökonomische Anreize, wie beispielsweise eine geringere Lizenzgebühr für recyclinggerecht designte Verpackungen, teilweise ungenutzt bleiben.<sup>20</sup>

### 2.1.3 Herausforderungen in der Praxis

Die Agierenden der Wertschöpfungskette Kunststoffe (vgl. Abbildung 3) weisen bezüglich der Etablierung eines geschlossenen Kreislaufs erfolversprechende Potenziale auf, müssen sich aber auch Herausforderungen stellen, die es zu überwinden gilt.

Ein wesentlicher Aspekt für die Etablierung eines funktionierenden kreislaufbasierten Kunststoffmarktes ist der Austausch der Agierenden entlang der Wertschöpfungskette. Ein solcher Austausch fördert das umfassende Verständnis für Prozesse anderer Wertschöpfungsstufen und hilft, entsprechende Verbesserungspotenziale aufzudecken. Voraussetzung hierfür war die Identifikation bestehender Herausforderungen, die auf Basis eines **zwei-jährigen Dialogprozesses** aller Agierenden der Wertschöpfungskette Kunststoffe wie folgt benannt wurden.<sup>21</sup>

---

<sup>18</sup> Vgl. Kunz Rechtsanwälte (2021).

<sup>19</sup> Vgl. Schiller, C. et al. (2020), S. 44ff.

<sup>20</sup> Vgl. Schiller, C. et al. (2020), S. 44ff.

<sup>21</sup> Vgl. VDI e.V. (2022).

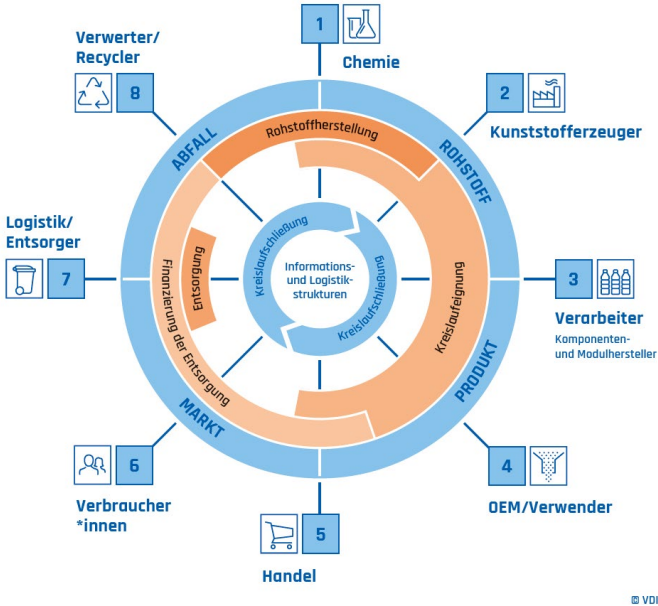


Abbildung 3: Agierende der Wertschöpfungskette Kunststoffe<sup>22</sup>

(a) Es existieren keine vergleichbaren Wettbewerbsbedingungen zwischen Rezyklaten und Kunststoffen aus fossilen Rohstoffen.<sup>23</sup>

Aktuell existiert kein ausgeglichener Wettbewerb zwischen Kunststoffrezyklaten und Neuware, sogenannter Virgin Ware. Daher wird von Unternehmen gefordert, dass kreislauffähige Produkte, insbesondere mit Rezyklatanteilen, über ökonomische Anreize bessergestellt werden, um Marktverzerrungen zugunsten solcher Produkte zu beheben. Das betrifft beispielsweise Bonus-Malus-Systeme für nachhaltige Industrie- und Konsumverpackungen. Dabei sollten auch die Reduktionen an Treibhausgasemissionen durch den Einsatz von Rezyklaten ausgewiesen und für eine Besserstellung zirkulärer Produkte herangezogen werden, u. a. über handelbare CO<sub>2</sub>-Zertifikate als Teil des Emission Trading Systems (ETS).

<sup>22</sup> © VDI e.V. (2022). Wiedergegeben mit Erlaubnis des Verein Deutscher Ingenieure e.V.  
<sup>23</sup> Vgl. VDI e.V. (2022), S. 3.

**(b) Es existiert eine Disbalance von Angebot und Nachfrage im Markt für Rezyklate.<sup>24</sup>**

Der Kunststoffrezyklatemarkt zeigt eine Diskrepanz zwischen hoher Nachfrage nach Kunststoffrezyklaten durch Herstellende und begrenztem Angebot der Recyclingbranche, die wiederum kleine Absatzmärkte und Wettbewerbsnachteile beklagt. Das ist vorrangig ein Qualitätsproblem: Oft genügen die vorliegenden Kunststoffrezyklate nicht den aus der Industrie geforderten Qualitäten. Ausreichend Rezyklatmengen minderer Qualität sind somit für einfache Produkte wie Parkbänke, Farbeimer oder Blumentöpfe vorhanden, werden jedoch durch die Industrie nicht abgenommen, da aufgrund des geringen Rohölpreises der Einsatz von Neuware wirtschaftlicher ist. Qualitativ hochwertige Kunststoffrezyklate werden zwar durch Herstellende nachgefragt – auch aus einem steigenden Druck aus der Kundschaft heraus –, sind jedoch nicht ausreichend und in kontinuierlicher Menge verfügbar.

### **Standardisierung von Kunststoffrezyklaten**

In den letzten Jahren haben sich **Zertifizierungen** etabliert, die Kunststoffrezyklate nach festgelegten Kriterien bewerten. Dazu gehören Zertifikate wie EuCertPlast und flustix RECYCLED von DIN CERTCO. Diese belegen u. a. die Herkunft des Rezyklats, betrachten den Recyclingprozess (inkl. der gesamten Lieferkette) und bewerten den durchlaufenen Qualitätssicherungsprozess sowie eine kontinuierliche Verfügbarkeit.<sup>25</sup>

Zusätzlich wurde im Dezember 2021 die **DIN SPEC 91446** „Klassifizierung von Kunststoff-Rezyklaten durch Datenqualitätslevel für die Verwendung und den (internetbasierten) Handel“ veröffentlicht. Die Norm unterscheidet und klassifiziert Kunststoffrezyklate in vier Datenqualitätsstufen. Auf diese Weise wird die Charakterisierung von Kunststoffrezyklaten erleichtert und die Kommunikation der Agierenden der Wertschöpfungskette unterstützt.

---

<sup>24</sup> Vgl. VDI e.V. (2022), S. 4.

<sup>25</sup> Vgl. Lange, U. (2021).

Zudem dient die DIN SPEC 91446 als Grundlage für eine folgende europäische Norm und fördert damit den global ausgerichteten Kunststoffmarkt.<sup>26</sup>

**(c) Es herrscht eine fragmentierte Wertschöpfung in der Kunststoffwirtschaft vor<sup>27</sup>**

Die Kunststoffwirtschaft besteht aus verschiedenen, unterschiedlich großen Agierenden mit diversen Produkt- und Materialanforderungen. Wenige große Kunststoffherzeugende und viele kleine und mittelständische Verarbeitende, Abfallentsorgende und Recyclende bilden eine zersplitterte Wertschöpfungsstruktur. Der gemeinsame Transformationsprozess hin zu einer ressourceneffizienten Kunststoffkreislaufwirtschaft steht daher vielfältigen Herausforderungen gegenüber und bedarf intensiver Kooperation und Koordination entlang des gesamten Wertschöpfungsprozesses.<sup>28</sup>

**(d) Es bestehen technologische Grenzen und Zielkonflikte.<sup>29</sup>**

Kunststoffe eignen sich aufgrund ihrer Eigenschaften (leicht, lebensmittelbeständig, bedruckbar, flexibel usw.) für zahlreiche unterschiedliche Anwendungen. So ist es beispielsweise im Lebensmittelbereich möglich, die Lebensdauer der verpackten Produkte zu verlängern. Oftmals bestehen solche Verpackungen u. a. aus Verbundwerkstoffen oder Werkstoffgemischen, für die ein Recycling nach dem üblichen mechanischen Verfahrensweg (vgl. Kapitel 2.2) nicht möglich ist. Andere Sammel- und Recyclinglösungen, die eine Verwertung bieten, existieren zwar, bedürfen aber zum Teil eines erhöhten Energie- und Rohstoffverbrauchs. Eine Bewertung anvisierter Lösungen setzt daher die Betrachtung des gesamten Lebenswegs voraus. Die notwendigen Aufwendungen sollten nicht diejenigen der Herstellung von Produkten aus Primärrohstoffen übersteigen, damit eine tatsächliche Einsparung an Treibhausgasemissionen erzielt wird.

---

<sup>26</sup> Vgl. DIN e. V. (2021).

<sup>27</sup> Vgl. VDI e.V. (2022), S. 4.

<sup>28</sup> Vgl. VDI e.V. (2022), S. 4.

<sup>29</sup> Vgl. VDI e.V. (2022), S. 4.



### **Gute-Praxis-Beispiel: Rezyklatinitiativen**

Recyclinginitiativen sind Verbünde von Agierenden aus Forschung, Wirtschaft und Politik, die kreislaufwirtschaftliche Strukturen untersuchen und entwickeln sowie Chancen und Herausforderungen aufzeigen, wie eine ökologisch und ökonomisch nachhaltige Kreislaufführung – insbesondere in Bezug auf den Sekundärrohstoffeinsatz – in die Praxis umzusetzen ist. So wurde im Jahr 2018 das **Forum Rezyklat** zur Förderung der Kreislaufwirtschaft gegründet. Die über 60 Mitglieder stammen mehrheitlich aus Handel, Herstellung, Entsorgung und Verpackungsherstellung und gliedern sich in die vier Fachbereiche „Stammdatenmanagement“, „Technologie und Recyclingfähigkeit“, „Endverbraucher-Kommunikation“ und „Verpackungsreduzierung“, zu denen die Mitglieder Strategien und Maßnahmen entwickeln.

Es konnte zum Beispiel im Bereich Stammdatenmanagement die Abbildung der Recyclinganteile von Verpackungsmaterialien im Global Data Synchronisation Network (GDSN, weltweiter Verbund zertifizierter Stammdatenpools) umgesetzt werden. Das ermöglicht die transparente Übertragung von Informationen im Liefernetzwerk sowie den reibungslosen Abruf der Daten von den Wertschöpfungsstufen.

Dieser Schritt wiederum ebnet den Weg zur Etablierung von Produktpässen, die die Realisierung einer ressourceneffizienten Kreislaufwirtschaft noch weiter fördern können.<sup>30</sup>

### **(e) Die politische Regulierung ist bislang auf Abfall ausgerichtet.<sup>31</sup>**

Im Jahr 2012 wurde das ehemalige Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz durch das aktuell geltende Kreislaufwirtschaftsgesetz abgelöst. Dennoch sind die gesetzlichen Regelungen stark auf die Entsorgungsphase ausgerichtet. Dieser Fokus ändert sich erst seit kurzem. Die Gestaltung der gesetzlichen Regelungen nimmt zunehmend die gesamte Wertschöpfungskette in

---

<sup>30</sup> Vgl. Forum Rezyklat (2022).

<sup>31</sup> Vgl. VDI e.V. (2022), S. 5.

den Fokus und stellt Anforderungen an alle Agierenden. Hierzu zählen beispielsweise der **Green Deal** der EU (zum Beispiel die „Plastic Strategy“ oder der Circular Economy Action Plan) sowie die **Ökodesign-Richtlinie**.

### **Aktuelle Entwicklungen im chemischen Recycling**

Aktuell steht die wiederaufkommende Bedeutung des chemischen Recyclings im Mittelpunkt der Fachdiskussionen. Mithilfe des chemischen Recyclings oder einer sogenannten rohstofflichen Verwertung werden die Kunststoffe in ihre chemischen Bestandteile zerlegt und der Wertschöpfungskette in Form von Rohstoffersatz wieder zugeführt. Da das chemische Recycling durch energieintensive Prozesse charakterisiert ist, konnten sich die Technologien aus ökobilanzieller sowie marktwirtschaftlicher Sicht in den vergangenen Dekaden nicht durchsetzen. Technische Lösungen arbeiten bisher ausschließlich als Pilot- oder Demonstrationsanlagen.

Aktuelle Entwicklungen und Innovationen zeigen jedoch, dass sich das chemische Recycling technisch und ökologisch weiterentwickelt hat. Insbesondere für Materialverbünde, die über das mechanische Recycling nicht verwertet werden können, bietet das chemische Recycling eine Alternative.

**Als Ergänzung zum mechanischen Recycling** ist es so möglich, weitere Stoffströme für die Rückführungen in den Wirtschaftskreislauf zu erschließen (vgl. Kapitel 2.3.2) und Primärrohstoffe sukzessive zu ersetzen.

### **(f) Der Handlungsdruck auf die Kunststoffbranche ist durch die öffentliche Kommunikation hoch.<sup>32</sup>**

Insbesondere aufgrund von Berichten über den steigenden Plastikverbleib in den Ozeanen sind Kunststoffabfälle in den öffentlichen Fokus gerückt. Der gesellschaftliche Druck auf die Kunststoffbranche, nachhaltige Lösungen anzubieten, erhöht sich daher kontinuierlich. Diese sollten einen systemischen Ansatz verfolgen, um eine umfassende Transformation des Wertschöpfungskreislaufs zu garantieren und eine einheitliche Kommunikationsgrundlage zu schaffen.

---

<sup>32</sup> Vgl. VDI e.V. (2022), S. 5.

### Entwicklung eines Recyclinglabels

Die Bundesregierung hat im Koalitionsvertrag 2021 beschlossen, ein Recyclinglabel einzuführen.<sup>33</sup> Dafür wurden Haushaltsmittel in Höhe von 600.000 Euro zur Verfügung gestellt. Dieses Budget soll für die „Erstellung einer Konzeption für die inhaltliche und organisatorische sowie prozedurale Ausgestaltung eines Recyclinglabels und auch die fachliche Begleitung der Einführungsphase des Recyclinglabels“<sup>34</sup> eingesetzt werden.

Ziel ist es, eine verlässliche und transparente Information hinsichtlich der Rezyklatanteile bzw. der Anteile an Sekundärrohstoffen in Produkten für die Verbrauchenden zur Verfügung zu stellen. Auf diese Weise wird eine Kaufentscheidung zugunsten umweltfreundlicherer Produkte sukzessive erleichtert und unterstützt.

Den aufgezählten Herausforderungen wird in der Kunststoffbranche mit verschiedenen Entwicklungen begegnet. Sowohl in der unternehmerischen Praxis als auch in der Forschung werden Anstrengungen unternommen, um den Kreislauf für Kunststoffe zu stärken und zu stabilisieren (vgl. Kapitel 2.3).

## 2.2 Stand der Technik

Die **Erfassung und Sortierung** von Kunststoffabfällen (Leichtverpackungen und andere Wertstoffe aus der Gelben Tonne, Post-Consumer-Abfälle sowie haushaltsähnliche Gewerbeabfälle) erfolgt nach dem Stand der Technik in verschiedenen Verfahrensschritten, die - abhängig von der jeweiligen Anlage - unterschiedlich arrangiert sind. Auf diese Weise können mehr als zehn verschiedene Sortierfraktionen sortiert und der weiteren Aufbereitung zugeführt werden (vgl. Abbildung 4).<sup>35</sup>

---

<sup>33</sup> Vgl. Bundesregierung der Bundesrepublik Deutschland (2021).

<sup>34</sup> Vgl. Thews, M. (2022).

<sup>35</sup> Vgl. Knappe, F. et al. (2021), S. 49f.

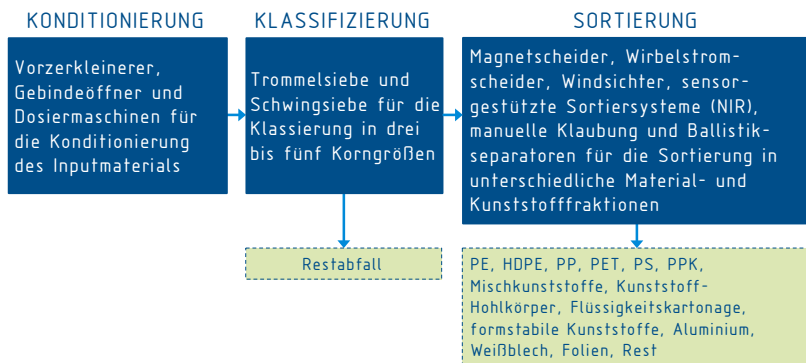


Abbildung 4: Erfassung und Sortierung von Abfällen (eigene Darstellung)<sup>36</sup>

Gemäß Tabelle 1 werden vom Gesamtinput der Post-Consumer-Abfälle nach der Erfassung und Sortierung nur 45,4 Prozent der stofflichen Verwertung zugeführt. Dieser Umstand drückt sich durch die Ausbeute der Produktfraktionen bezogen auf den Polymeranteil im Input aus (vgl. Tabelle 2).

Tabelle 2: Ausbeute aus der Sortierung je Stofffraktion<sup>37</sup>

Stofffraktion	Ausbeute bezogen auf Input je Stofffraktion
PE	52 Ma.-%
PP	49 Ma.-%
PS	48 Ma.-%
PET	95 Ma.-%
Folien-Fraktion (> DIN A4)	32 Ma.-%

Der übrige Mengenstrom kann durch Verunreinigungen, Fehlwürfe etc. nicht aussortiert werden und gelangt in die energetische Verwertung. Es gibt jedoch inzwischen Sortieranlagen, die hohe Sortierquoten erreichen. Eine im Jahr 2018 installierte Gute-Praxis-Anlage zur Sortierung von Post-Consumer-Abfällen und haushaltsähnlichen Gewerbeabfällen ist bereits in der Lage, ei-

<sup>36</sup> Vgl. Knappe, F. et al. (2021), S. 49.

<sup>37</sup> Knappe, F. et al. (2021), S. 53.

nen Output von rund 53 Prozent (bezogen auf den Gesamtinput) zu erzeugen, der der werkstofflichen Verwertung zugeführt werden kann.<sup>38</sup> Eine Ausnahme stellt hierbei der PET-Stoffstrom dar, der nahezu vollständig aussortiert bzw. getrennt gesammelt wird.

Nach der Sortierung gelangen die sortierten resp. bereits separat gesammelten Fraktionen in die **werkstoffliche Verwertung**. Zur Herstellung von Mahlgut, Agglomerat oder Regranulat hat sich in der Praxis eine Kombination unterschiedlicher trocken- und nassmechanischer Verfahren zur Abtrennung von Störstoffen und Erzeugung von Kunststoffprodukten definierter Eigenschaften etabliert (vgl. Abbildung 5).

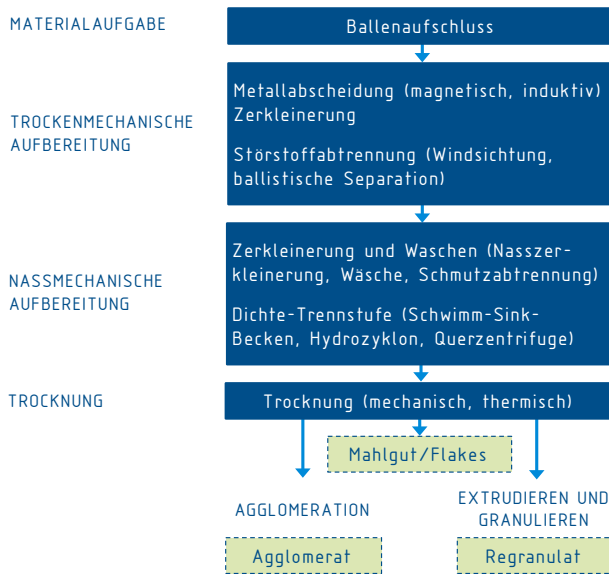


Abbildung 5: Werkstoffliche Verwertung (eigene Darstellung)<sup>39</sup>

Beispiele aus der Praxis zeigen, dass nach dem neuesten Stand der Technik installierte Anlagen bereits in der Lage sind, Rezyklate mit guter Qualität zu

<sup>38</sup> Vgl. MEILO Gesellschaft zur Rückgewinnung sortierter Werkstoffe mbH & Co. KG (2022).

<sup>39</sup> Vgl. Knappe, F. et al. (2021), S. 73.

erzeugen. Durch besondere Verfahren der Vorsortierung und Reinigung können in einem Fall sowohl die Parfümanhaftungen von Kosmetik- und Hygieneverpackungen entfernt als auch das Recycling von Bechern, Schalen oder Flaschen zu neuen Produkten von gleicher Art erreicht werden.<sup>40</sup> Diese Form der werkstofflichen Aufbereitung ermöglicht es, die Kunststoffrezyklate für ihren ursprünglichen Zweck wieder einzusetzen. Insbesondere Kooperationen über Wertschöpfungsstufen hinweg ermöglichen eine effizientere Gestaltung der Stoffströme. So konnte in einem weiteren Beispiel Verpackungsmaterial aus PP und HDPE mithilfe von Rezyklaten aus dem Gelben Sack hergestellt und somit der Kreislauf direkt geschlossen werden.<sup>41</sup>

## 2.3 Innovative Recyclingtechnologien

Neben den bewährten Recyclingtechnologien gibt es eine Reihe weiterer Entwicklungen für die Sortierung von Kunststoffen, die im Folgenden näher beleuchtet werden. An dieser Stelle sei darauf verwiesen, dass die Entwicklungen von Recyclingverfahren immer auch **vor dem Hintergrund der Digitalisierung** zu verfolgen sind. So beschäftigen sich Projekte wie zum Beispiel „KIOptiPack – Ganzheitliche KI-basierte Optimierung von Kunststoffverpackungen mit Rezyklatanteil“ und „K3I-Cycling – KI-gestützte Optimierung der Kreislaufführung von Kunststoffverpackungen“ mit der digitalen Vernetzung aller Wertschöpfungsstufen über die Anwendung von künstlicher Intelligenz, um den Kunststoffkreislauf von Verpackungen zu schließen.<sup>42</sup>

### 2.3.1 Sortierung von Kunststoffwertstoffen

#### Detektion schwarzer Kunststoffe

Die Sortierung von Kunststoffabfällen ist dem grundsätzlichen Problem unterworfen, dass insbesondere **schwarze Kunststoffe** nicht aus dem Wertstoffstrom entfernt werden können. Im Sortierprozess wird durch Nahinfrarot-Scanner (NIR) Licht auf die passierenden Kunststoffe geworfen. Das reflektierte Nah-Infrarot-Spektrum wird gemessen und analysiert. Jede Kunststoffart besitzt dabei ein typisches Spektrum und wird durch nachgelagerte

---

<sup>40</sup> Vgl. Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie und Mobilität des Landes Rheinland-Pfalz (2022).

<sup>41</sup> Vgl. VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH (2018).

<sup>42</sup> Vgl. Fraunhofer-Institut für Verfahrenstechnik und Verpackung IVV (2023).

Druckluftdüsen aussortiert. Zur Schwärzung der Kunststoffe wird Ruß eingesetzt, das einen Großteil der Strahlung im sichtbaren und im infraroten Wellenlängenbereich absorbiert. Das detektierbare Spektrum hat eine zu geringe Intensität, um durch die NIR-Scanner erkannt zu werden. Eine Sortierung nach Kunststoffart wird dadurch in der Regel unmöglich.

Es existieren bereits Sortiertechnologien auf dem Markt, die in der Lage sind, die schwarzgefärbten Kunststoffe auszusortieren. Hierzu wurde eine **Sortieranlage entwickelt**, die zur Aufkonzentration von dunklen Objekten einer LVP-Anlage nachgeschaltet werden kann. Durch die Anwendung der Hyper Spectral Imaging (HSI) - Technologie im mittleren Infrarotbereich können auch rußgefärbte Objekte mit einer Größe von 10 bis 40 Millimetern detektiert und positiv aussortiert werden.<sup>43</sup> Diese Anlagen können in bestehende Sortieranlagen integriert werden, benötigen jedoch einen entsprechenden Platzbedarf und hohe Investitionen.<sup>44</sup>

### Detektierbares Schwarz

In der **Produktentwicklung** wurde bereits auf die Herausforderung der Sortierbarkeit geschwärzter Kunststoffe reagiert. Ein Unternehmen entwickelte ein schwarzes Pigment, das ein hohes Deckvermögen und Anforderungen für sensible Anwendungsbereiche wie Lebensmittelverpackungen erfüllt. Das Pigment kann über NIR-Scanner erkannt und entsprechend aussortiert werden. Es verfügt laut Herstellung über eine hohe Verarbeitungsstabilität – auch über mehrere Verarbeitungsschritte hinweg – und kann daher für geschlossene Recyclingkreisläufe in Betracht gezogen werden. Der Einsatz in geschlossenen Recyclingkreisläufen setzt dabei jedoch voraus, dass es zu keiner Vermischung mit anderen schwarzen Kunststoffen kommt.<sup>45</sup>

---

<sup>43</sup> Vgl. Knappe et al. (2021), S. 51f.

<sup>44</sup> Vgl. Knappe et al. (2021), S. 111.

<sup>45</sup> Vgl. packaging journal (2020).

### Separation durch elektrostatische Aufladung

Der Einsatz von **elektrostatischen Separatoren** ist eine bereits etablierte, aber alternative Möglichkeit, Kunststoffe ohne den Einsatz optischer Systeme zu trennen. Hier werden in einer Aufladeinheit die Kunststoffsorten entsprechend ihren Eigenschaften aufgeladen. So lädt sich beispielsweise in einem ABS-PS-Gemisch das Polyesterol negativ auf, während sich das Acrylnitril-Butadien-Styrol positiv auflädt. In einem sich anschließenden Elektrodensystem können die Kunststoffe mit hohen Reinheitsgraden voneinander getrennt werden. Die Technologie setzt voraus, dass die zu trennenden Kunststoffe trocken, aufgeschlossen sowie entstaubt und idealerweise in einem Zweistoff-Gemisch vorliegen. Das Verfahren hat sich bereits etabliert für die Abtrennung von Gummi aus PVC von Fensterprofilen, für Getränkeflaschen und die Trennung von PS und ABS aus dem Elektronikschrott.<sup>46, 47</sup>

### Einsatz von Markern

Eine weitere Möglichkeit der Trennung von Kunststoffen bieten sogenannte **Marker**. Im Zuge einer Kooperation aus drei Unternehmen wurde ein Marker entwickelt, der auf Produkten aufgedruckt wird. Dazu werden **UV-Siebdruckfarben** genutzt, die ein definiertes Spektrum aufweisen. Mithilfe eines Updates werden diese Informationen in das Analysetool des NIR-Scanners integriert, sodass beispielsweise Food- von Non-Food-Verpackungen getrennt oder nicht recyclingfähige Produkte aus dem Materialstrom aussortiert werden können. Diese Vorgehensweise erhöht die Reinheit und damit die Qualität des Kunststoffstroms, der einer stofflichen Verwertung zugeführt wird.<sup>48</sup>

Ein weiteres Beispiel setzt **fluoreszenzbasierte Marker** ein, um eine Sortierung zu ermöglichen.<sup>49</sup> Dieser Marker wird entweder in das Produkt oder auf das Etikett aufgebracht und besitzt ein spezifisches Spektrum, das mittels Fluoreszenzspektroskopie ausgelesen wird. Das sogenannte **Tracer-Based-Sorting (TBS)** ermöglicht es dabei, Kunststoffverpackungen unabhängig von Form, Farbe und Verschmutzung zu trennen und gezielt für den

---

<sup>46</sup> Vgl. Köhnlechner, R.; Jung, H. und Geisler, W. (2012).

<sup>47</sup> Vgl. hamos GmbH (2023).

<sup>48</sup> Vgl. Brunn, M. (2021).

<sup>49</sup> Vgl. Polysecure GmbH (2022).



ursprünglichen Verwendungszweck zu verwerten. Alte Lebensmittelverpackungen können dann beispielsweise wieder zu einer Lebensmittelverpackung verarbeitet werden.<sup>50</sup> Zudem ist es möglich, mehr Kunststoffarten sowie verschiedene Typen einer Kunststoffart zu identifizieren. Untersuchungen haben gezeigt, dass mithilfe dieser Technologie eine Erkennung von nahezu 100 Prozent erreicht werden kann.<sup>51</sup> In Kooperation mit einem Unternehmen der optischen Industrie wurde – aufbauend auf den Fluoreszenzmarkern – eine Sortiertechnologie entwickelt, die mehrere **Detektionstechnologien kombiniert**. Dazu zählen eine Tracer-Detektion, eine NIR-(Nahinfrarot-)Messung, eine Farbmessung und Bilderkennung (KI – künstliche Intelligenz) sowie gegebenenfalls die Detektion einer Wassermarken. Die Anlage steht als Technikum für Versuche interessierter Agierender der Kreislaufwirtschaft in Freiburg zur Verfügung.<sup>52</sup> Vorversuche sind insofern von Relevanz, als das Tracer-Based-Sorting eine **komplexe Innovation** darstellt. Eine breite Umsetzung der Technologie in die Praxis hat Auswirkungen auf die gesamte Wertschöpfungskette und bedarf einer Anpassung der aktuell eingesetzten Sortiertechnologien. Zudem ergeben sich weitere Herausforderungen in Bezug auf den Ort der Markierung. Der gesetzte Marker auf dem Etikett ermöglicht die Sortierung ganzer Produkte. Die folgende Flakesortierung des zerkleinerten Produkts kann jedoch nicht mehr über die Marker erfolgen. Wird der Marker im Produkt eingebracht, setzt dies geschlossene Kreisläufe voraus. Das Produkt muss für seinen ursprünglichen Zweck eingesetzt werden, da es sonst zu Verschleppungen oder Vermischungen der Marker in der stofflichen Verwertung kommt, die eine erneute Sortierung behindern.<sup>53</sup>

Eine weitere Sortierungstechnologie auf Basis von gesetzten Markern ist das sogenannte **digitale Wasserzeichen**. Das Projekt HolyGrail 1.0 lief von 2016 bis 2019 und untersuchte mit Projektmitgliedern der gesamten Wertschöpfungskette Kunststoffe, hier u. a. das Potenzial digitaler Wasserzeichen als Sortierungstechnologie. Dabei wird das Etikett oder die Oberfläche von Verpackungen mehrfach mit einem nicht wahrnehmbaren optischen

---

<sup>50</sup> Vgl. Ecologic Institut gemeinnützige GmbH (2022).

<sup>51</sup> Vgl. Ecologic Institut gemeinnützige GmbH (2022).

<sup>52</sup> Vgl. EU-Recycling Magazin (2022b).

<sup>53</sup> Vgl. Krüger, F. (2020), S. 19.

Code von mindestens einem Quadratzentimeter Größe bedruckt bzw. geprägt. Farbkameras erkennen bzw. scannen den Code und können aufgrund der hinterlegten Eigenschaften eine spezifischere Sortierung im Vergleich zur klassischen Trennung vornehmen. Die digitale Markierung kann über die gesamte Fläche der Verpackung wiederholt aufgedruckt werden. So sind eine Lageunabhängigkeit sowie eine Verschmutzungs- und Beschädigungstoleranz gegeben. Durch die Zerkleinerung der Verpackungen wird das digitale Wasserzeichen gelöscht und ist für eine anschließende Sortierung der Flakes, die zumeist kleiner sind als ein Quadratzentimeter, nicht mehr nutzbar.<sup>54</sup> Am Ende des Projektes wurde ein Proof-of-Concept vorgestellt und das Verfahren anhand einer Test-Sortieranlage demonstriert. Das Projektvorhaben **HolyGrail 2.0** greift die Erkenntnisse des Vorgängerprojekts auf und zielt auf eine Hochskalierung der Technologie auf Industrieelevel ab. Aktuell laufen Untersuchungen an einer Pilotanlage. Eine entwickelte Detektoreinheit zur Sortierung von Verpackungsmaterial aus Kunststoffen und Faserverbundwerkstoffen erzielte eine durchschnittliche Detektionsrate von 99 Prozent, eine Aussortierungsrate von 96 Prozent und einen Reinheitsgrad der sortierten Fraktionen von 93 Prozent (vgl. Tabelle 3).<sup>55</sup>

**Tabelle 3: Sortierergebnisse der Anwendung der digitalen Wassermarke<sup>56</sup>**

Fraktion	Detektionsgrad	Sortiergrad	Reinheitsgrad
PP	99,6 %	99,6 Gew.-%	94,2 Gew.-%
PET	99,1 %	95,7 Gew.-%	92,6 Gew.-%
Faserverbundwerkstoffe	98,9 %	97,0 Gew.-%	93,1 Gew.-%
PE-Folien	97,6 %	92,0 Gew.-%	90,8 Gew.-%

Durch den erfolgreichen Abschluss der Untersuchungen konnte der Technologiereifegrad auf TRL 6 (Prototyp in Einsatzumgebung) gebracht werden. Ziel des Projektes ist es, nach Abschluss aller Untersuchungen den Technologiereifegrad TRL 9 (Qualifiziertes System mit Nachweis des erfolgreichen Einsatzes) zu erreichen.<sup>57</sup>

<sup>54</sup> Vgl. Krüger, F. (2020), S. 21.

<sup>55</sup> Vgl. Digital Watermarks (2022).

<sup>56</sup> Digital Watermarks (2022).

<sup>57</sup> Vgl. AIM - European Brands Association (2021).

## Einsatz von Produktpässen

Der Vorteil der beschriebenen Marker ist die zusätzliche Speicherung von Attributen. So können beispielsweise Informationen zum herstellenden Unternehmen, zur Lagerhaltungseinheit (SKU), Art des verwendeten Kunststoffes und Zusammensetzung, zur Lebensmittelechtheit, zum Rezyklatanteil usw. hinterlegt werden.<sup>58</sup> Auf diese Weise wird die Technologie ebenfalls für **Produktpässe** relevant, die perspektivisch eine wertschöpfungsübergreifende Informationsweitergabe ermöglichen.

Hierzu wurde ein branchenübergreifendes Konsortium gegründet, das an einem **offenen und weltweit anwendbaren Rückverfolgungsstandard** (digitaler Produktpass) arbeitet. Ziel ist es, recycelbare Verpackungen entlang der Wertschöpfungskette zu verfolgen und eine lückenlose Dokumentation zu ermöglichen. Die Informationen sind über eine Markierung auf der Verpackung – zum Beispiel einen QR-Code oder eine digitale Wassermarken – auslesbar, basieren auf den GS1-Standards<sup>59</sup> und werden auf einer gemeinsamen Datenplattform gespeichert.<sup>60</sup> Im Rahmen des Konsortiums sind verschiedene Pilotprojekte von Mitgliedern gestartet, die die Machbarkeit des digitalen Produktpasses in Form von Markierungen in der Praxis testen. Eines der Pilotprojekte entwickelte ein Datenerfassungssystem als Schnittstelle zwischen einer Extrusionsblasformproduktion und der Plattform, die Produktionsdaten in **Echtzeit** überträgt. Diese sollen am Ende des Lebenszyklus durch Abfallsortiersysteme mit Standard-Erkennungstechnologien auslesbar und entsprechend sortenrein sortierbar sein.<sup>61</sup>

Insbesondere die transparente Weitergabe von Produktinformationen entlang des gesamten Wertschöpfungsprozesses stellt ein hochaktuelles Thema dar. Hierzu entwickelt und untersucht eine **Rezyklatinitiative** mit über 60 Mitgliedern derzeit Strategien und Maßnahmen u. a. zum Stammdatenmanagement. Ziel ist es, eine einheitliche und digital verarbeitbare Datengrundlage zu schaffen, die national wie international zur Anwendung kommen

---

<sup>58</sup> Vgl. AIM - European Brands Association (2021).

<sup>59</sup> Vgl. GS1 Germany GmbH (2022).

<sup>60</sup> Vgl. R-Cycle (2022a).

<sup>61</sup> Vgl. R-Cycle (2022b).

kann. Durch die Kooperation mit GS1 Germany wird es u. a. möglich, Recyclinganteile von Verpackungsmaterialien im Global Data Synchronisation Network (GDSN) – dem weltweiten Verbund zertifizierter Stammdatenpools – abzubilden. Relevante Produktdaten können auf diese Weise transparent entlang der Liefer- bzw. Wertschöpfungskette kommuniziert werden.<sup>62</sup>

Das im September 2022 gestartete Projekt K3I-Cycling zielt ebenfalls darauf ab, mithilfe eines Artificial Neural Twin **einen Leichtverpackungsprodukt-pass** zu entwickeln. Auch in diesem Fall ist es das Ziel, relevante Informationen entlang der Wertschöpfungskette der Kunststoffverpackungen weiterzugeben, um zur Optimierung des Gesamtsystems beizutragen.<sup>63</sup>

Sämtliche vorgestellte Maßnahmen und Projekte mit dem Ziel, Produktinformationen entlang der Wertschöpfungskette bereitzustellen, ermöglichen eine bessere Nachverfolgbarkeit von Materialien und Waren. Einschätzungen aus der Praxis legen dabei nahe, dass diese Technologien zwar sukzessive neue Märkte erschließen, jedoch nicht in der Lage sind, die derzeitige Technik zu ersetzen. Sie stellen vielmehr eine **Ergänzung und Optimierung dar**. Folgende Vorteile werden dabei hervorgehoben:<sup>64</sup>

- Trennung von Food- und Non-Food-Verpackungen
- Gezieltes Ausschleusen qualitätsmindernder Inhalte
- Farbsortierung
- Qualitätstransparenz

Darüber hinaus werden von Seiten der Entsorgungsbranche für die Zukunft noch weitere Punkte gefordert, die ein effizienteres Kunststoffrecycling för-

---

<sup>62</sup> Vgl. Forum Rezyklat (2022).

<sup>63</sup> Vgl. Fraunhofer-Institut für Verfahrenstechnik und Verpackung IVV (2023).

<sup>64</sup> Vgl. DGAW – Deutsche Gesellschaft für Abfallwirtschaft e.V. (2021).

dern. Hierzu zählen u. a. (noch) recyclinggerechtere Verpackungen, eine intensivere Kooperationen aller Beteiligten der Wertschöpfungskette sowie eine Nachfragesteigerung für Rezyklate.<sup>65</sup>

### 2.3.2 Verwertung zu Kunststoffrezyklaten

Nach der Sortierung werden die Kunststofffraktionen hauptsächlich werkstofflich verwertet (vgl. Kapitel 2.2). Neben den bewährten **mechanischen Recyclingtechnologien** haben sich insbesondere im rohstofflichen bzw. **chemischen Recycling** neue Verfahren entwickelt. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass das chemische Recycling als **Ergänzung zur Standardtechnologie** des mechanischen Recyclings zu verstehen ist. Dies gilt insbesondere für Kunststoffabfallströme wie beispielsweise Mischkunststoffe, die über das mechanische Recycling nur unzureichend verwertet werden können. Neue Anforderungen an das Produktdesign von Kunststoffverpackungen (wie zum Beispiel der Einsatz von Monokunststoffen) sollen dazu führen, sortenreine Sortierfraktionen zu erhöhen. Über das mechanische Recycling als Standardtechnologie können auf diese Weise weitere Mengen an Kunststoffrezyklaten erschlossen werden. Für die sortierte Fraktion der Mischkunststoffe, aber auch für weitere spezifische Kunststoffabfallströme ist das chemische Recycling als alternative Technologie in der Lage, weitere Sekundärrohstoffpotenziale zu heben.

#### Chemisches Recycling von Mischkunststoffen

Die Rittec Umwelttechnik GmbH entwickelte dahingehend eine neue Technologie, die Mischkunststoffe mit PET-Anteil in deren Monomere zerlegt. Die PET-Monomere können der Produktion in Neuwarenqualität wieder zugeführt werden. Diese Technologie entstand u. a. in enger Kooperation mit dem Institut für Chemische und Thermische Verfahrenstechnik der Universität Braunschweig. Im Rahmen der Forschungs- und Entwicklungsphase konnte nachgewiesen werden, dass mithilfe des Verfahrens mehr als 45 Prozent der CO<sub>2</sub>-Emissionen gegenüber der PET-Neuproduktion aus Rohöl eingespart werden. Die patentierte **revolPET®**-Technologie zeichnet sich dabei durch eine kontinuierliche Depolymerisation des Polyesterpolymers in die Grundbausteine Terephthalsäure (TA) und Monoethylenglykol (MEG) aus. Dieser

---

<sup>65</sup> Vgl. DGAW – Deutsche Gesellschaft für Abfallwirtschaft e.V. (2021).

Prozess erfolgt auf Basis einer Feststoff-Feststoff-Reaktion in einem Standardextruder, wobei die freiwerdende Reaktionsenergie direkt für die Beschleunigung der nachfolgenden Reaktionen genutzt wird. So werden Prozesszeiten von unter einer Minute erreicht, in der 95 Prozent der PET-Polymere zerlegt werden. Die übrigen Reststoffe reagieren während dieses Verfahrens nicht und können somit nach dem Herauslösen des PET einer weiteren Verwertung zugeführt werden.<sup>66</sup> Das Verfahren ist bereits bei mittelgroßen Kapazitäten wirtschaftlich einsetzbar und kann so an dezentral verfügbare Sekundärrohstoffströme angebunden werden.<sup>67</sup>

Das sogenannte **Newcycling®**-Verfahren der APK AG, ein weiteres patentiertes Verwertungsverfahren, verwertet Mischkunststoffe und Mehrschichtverpackungen (Multilayer-Verpackungen), um daraus sortenreine Granulate an LDPE und PA mit ähnlichen Eigenschaften primärer Kunststoffe herzustellen. Dazu werden die angelieferten Ballen aus der Haushalts- sowie Gewerbesammlung aufgelöst und zerkleinert, die Kunststoffflakes gewaschen und über die Dichte voneinander getrennt. In einem Lösemittelbad werden die Kunststoffe dann selektiv gelöst. Es folgt ein mehrstufiger Prozess, durch den zunächst die flüssigen von den festen Bestandteilen getrennt werden, das Polymer gereinigt und das Lösemittel entfernt wird. Das Lösemittel wird anschließend wieder aufbereitet und kann so dem Newcycling®-Prozess abermals zugeführt werden. Ziel des Unternehmens ist es, die Produktpalette der derzeit hergestellten LDPE- und PA-Regranulate um weitere Zielpolymere – wie beispielsweise PP und PVC – zu erweitern.<sup>68</sup>

Die Aktualität des Kunststoffrecyclings gibt die Vielzahl neuer, teils rezyklatenspezifischer Projekte und Technologieentwicklungen wieder. Eine Auswahl ist folgend tabellarisch dargestellt (vgl. Tabelle 4).

---

<sup>66</sup> Vgl. RITTEC Umwelttechnik GmbH (2022).

<sup>67</sup> Vgl. Paschetag, M.; Scholl, S. und Eichert, C. (2022).

<sup>68</sup> Vgl. APK AG (2022).

Tabelle 4: Auswahl an Projekten zu innovativen Recyclingtechnologien für Kunststoffe

Recyclingverfahren	Resultierendes Rezyklat	Kurzerläuterungen zur Technologie	Quelle
Upcycling von PET, Werkstoffentwicklung aus gebrauchtem PET	Neuer Werkstoff auf Basis von PET	Auf Basis von gebrauchten PET-Flaschen wurde ein neuer Werkstoff hergestellt, der ähnliche mechanische Eigenschaften wie kurzglasfaserverstärkte Polyester bzw. Polyamide besitzt. Ein daraus hergestelltes Demonstratorbauteil wies eine geringe Schwindung, hohe Maßhaltigkeit und einen deutlich verbesserten CO <sub>2</sub> -Fußabdruck auf. Ein Folgeprojekt untersucht die Erschließung von stofflich nicht verwertbaren Bestandteilen aus PET-Verpackungsabfällen. <sup>69</sup>	Fraunhofer LBF (2021), Presseinformation
Moderne Pilotanlage zur Herstellung marktreifer Polymermaterialien	Folien und feste Kunststoff-Haushaltsabfälle	In Lahnstein betreiben die Firmen Borealis und TOMRA eine mechanische Recyclinganlage im Pilotmaßstab, durch die die erzeugten Polyolefine einen hohen Reinheitsgrad, einen geringen Geruch, eine hohe Produktbeständigkeit und nur leichte Farbabweichungen besitzen und so für anspruchsvolle Kunststoffanwendungen eingesetzt werden können. <sup>70</sup>	Borealis Group (2021), Pressemitteilung
Mechanisches Recycling durch PE/PA-Verbunden	PE/PA	Eine beauftragte Studie hat belegt, dass das mechanische Recycling von PE/PA-Verbunden nicht nur technisch möglich ist, sondern die Eigenschaften des entstehenden PE-Rezyklats durch den Verbund sogar positiv beeinflusst werden. Ein Versuch mit weiteren Verbunden wurde gestartet. In einem nächsten Schritt ist die Implementierung des Recyclings im industriellen Maßstab geplant. <sup>71</sup>	BASF (2021), Mechanisches Recycling
Chemisches Recycling durch das CreaSolv®-Verfahren	PVC	In einem Forschungsprojekt werden aus alten PVC-Bodenbelägen mittels des CreaSolv®-Verfahrens Additive wie Phthalate abgetrennt. Diese werden hydriert und erreichen dadurch eine REACH-Konformität. Das aus dem CreaSolv®-Prozess stammende PVC kann über die Zugabe von bspw. neuen Stabilisatoren oder recycelten Weichmachern zu neuem PVC für die Produktion von Fußbodenbelägen verarbeitet werden. <sup>72</sup>	Fraunhofer IVV (2022), Forschungsprojekt Circular Flooring
Chemisches Recycling durch das iCycle®-Verfahren (Pyrolyse)	Verschiedene	Neuartige patentierte Wärmetauscher-Technologien sorgen für einen besonders energieeffizienten Pyrolyseprozess und eine bessere Wärmeübertragung auf das zu rezyklierende Material. Der Prozess ist unter anderem für Shredder-Rückstände besonders gut geeignet und in der Lage, Schadstoffe wie Halogene abzuscheiden oder zu eliminieren. <sup>73</sup>	Fraunhofer Umsicht (2022), iCycle®-Verfahren

<sup>69</sup> Vgl. Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF (2021).

<sup>70</sup> Vgl. Borealisgroup (2023).

<sup>71</sup> Vgl. Newsroom Kunststoffverpackungen (2021).

<sup>72</sup> Vgl. Fraunhofer-Institut für Verfahrenstechnik und Verpackung IVV (2022).

<sup>73</sup> Vgl. Fraunhofer UMSICHT (2022).

### 2.3.3 Verwertungstechnologien auf biologischer Basis

Einige Enzyme besitzen die Fähigkeit, Kunststoffe zu zersetzen. Im Jahr 2012 wurde beispielsweise in Japan das **Enzym LCC** (Leaf-Branch Compost Cutinase) auf einem Komposthaufen entdeckt. Es gehört zu den polyester-spaltenden Hydrolasen und kann PET in seine Bestandteile Terephthalsäure (TA) und Monoethylenglykol (MEG) zersetzen. Die Forschung und Entwicklung nahmen diese Forschungsergebnisse auf und suchten beziehungsweise untersuchten weitere polyesterspaltende Hydrolasen. So konnten Forschende vom Institut für Analytische Chemie der Universität Leipzig sieben weitere Enzyme identifizieren, die in der Lage sind, amorphes PET zu zersetzen. Einer dieser Biokatalysatoren, **das Enzym PHL7**, zersetzte dabei 90 Prozent einer festgelegten Menge PET innerhalb von 16 Stunden. Bei gleichen Bedingungen konnte das Enzym LCC im Vergleich lediglich 45 Prozent des PETs abbauen. Der Grund dafür liegt in einem Bauteilunterschied der beiden Enzyme. Während beim Enzym LCC eine Stelle durch die Aminosäure Phenylalanin besetzt ist, wird diese Stelle beim Enzym PHL7 mit der Aminosäure Leucin ausgefüllt.

Ein Vorteil des enzymatischen Recyclings liegt in den energiearmen Verwertungsbedingungen, die lediglich eine wässrige Lösung und Temperaturen zwischen 65 und 70 °C voraussetzen. Weitere Forschungsarbeiten untersuchen die Übertragbarkeit der biologischen Abbaubarkeit von amorphen PET (zum Beispiel Verpackungsschalen für Obst und Gemüse) auf gestrecktes PET (zum Beispiel Getränkeflaschen).<sup>74</sup> Aktuell plant eine Kooperation aus zwei Unternehmen die Errichtung einer Produktionsanlage für das biologische Recycling von PET in Frankreich. Die Anlage soll im Jahr 2025 ihren Betrieb aufnehmen.<sup>75</sup> Die dahinterstehende Technologie zeichnet sich insbesondere dadurch aus, dass alle Arten von PET enzymatisch zerlegt werden können. Dazu wurde das eingesetzte Enzym angepasst und optimiert. Im Rahmen einer bereits erfolgreich umgesetzten Demonstrationsanlage konnten mit dem enzymatisch recycelten PET bereits lebensmitteltaugliche Musterflaschen hergestellt werden.<sup>76</sup>

---

<sup>74</sup> Vgl. Schick, B. (2022).

<sup>75</sup> Vgl. Bechlarz, D. (2022).

<sup>76</sup> Vgl. Plastverarbeiter (2021).



---

An dieser Stelle ist jedoch darauf hinzuweisen, dass der Kreislauf für PET durch die Standardrecyclingtechnologien bereits weitestgehend geschlossen ist (vgl. Tabelle 2). Eine alternative Technologie für das PET-Recycling stellt somit eine Ergänzung dar. Mit Blick auf eine kontinuierliche Mengenverfügbarkeit und die damit einhergehende Wirtschaftlichkeit bleibt daher abzuwarten, ob sich das Verfahren gegen etablierte PET-Recyclingverfahren behaupten kann.

## 3 BATTERIEN UND AKKUMULATOREN

### 3.1 Herausforderungen im Batterierecycling

Der Markt für die Herstellung sowie das Recycling von Batterien und Akkumulatoren unterliegt einem dynamischen Wachstum. Insbesondere die Nachfrage und Produktion von Lithium-Ionen-Batterien steigen derzeit enorm. Daher sind aktuell noch nicht verfügbare Recyclingkapazitäten sukzessive aufzubauen, um die sich erhöhenden Mengen an Lithium-Ionen-Batterien adäquat zu recyceln. Die Frage nach einer Hochskalierung der Recyclingkapazitäten von Industriebatterien, insbesondere Lithium-Ionen-Batterien in Deutschland, wurde mit Expertinnen und Experten aus dem Batteriemarkt in einem Fachgespräch erörtert. Die Ergebnisse können dem zweiten Teil dieser Kurzanalyse „Ergebnisse des Fachgesprächs“ entnommen werden.

#### 3.1.1 Aktuelle Recyclingsituation

Während derzeit insbesondere Blei-Säure-Batterien gesammelt und verwertet werden, wird in Zukunft mit einem **enormen (Bedarfs-)Anstieg bei Lithium-Ionen-Batterien** gerechnet, die letztlich auch einem adäquaten Recycling zuzuführen sind. Aktuell werden Lithium-Ionen-Batterien in der Sammelstatistik (noch) der Kategorie ‚Sonstige Batterien‘ zugeordnet (vgl. Tabelle 5). Hierunter fallen u. a. auch Lithium-Eisenphosphat-(LFP-), Alkali-Mangan-(AlMn-) und Zink-Kohle-(ZnC-)Altbatterien. Der seit 2018 zu verzeichnende Anstieg gemeldeter Mengen dieser Kategorie ist dabei hauptsächlich auf die Lithium-Ionen-Batterien zurückzuführen, aber auch auf Lithium-Eisenphosphat-Batterien.

Unterdessen können für alle Altbatterie-Kategorien Recyclingeffizienzen von bis zu über 80 Prozent erreicht werden. ‚Recyclingeffizienzen‘ geben gemäß Recyclingeffizienzverordnung (EU) 493/2012 das Verhältnis von Input (Masse der Altbatterien, die einem Recyclingverfahren zugeführt wurden) zum Output (Masse der zurückgewonnenen Sekundärrohstoffe) wieder. Dies entspricht einer Masse von ca. 146.500 Tonnen, die im Jahr 2020 als Sekundärrohstoffe u. a. für die erneute Batterieproduktion wiedergewonnen werden konnten. Die gesetzlich festgelegten Mindestrecyclingeffizienzen von 65 Prozent für Blei-Säure-Batterien, 50 Prozent für sonstige Batterien

und 75 Prozent für Nickel-Cadmium-Batterien wurden somit erfüllt (vgl. Tabelle 5).<sup>77</sup>

**Tabelle 5: Menge an Altbatterien, die einer Verwertung zugeführt werden (alle Batteriearten, u. a. Geräte-, Fahrzeug- und Industriebatterien)**<sup>78, 79</sup>

	Sammelmenge*	Recyclingeffizienz	Sammelmenge*	Recyclingeffizienz	Sammelmenge*	Recyclingeffizienz
	2020		2019		2018	
Blei-Säure-Batterien	150.943 t <sup>80</sup>	81,6 % (65 %)**	205.254 t	81,9 % (65 %)	200.410 t	80,6 % (65 %)
Nickel-Cadmium-Batterien	1.048 t	79,5 % (75 %)	1.353 t	77,6 % (75 %)	1.221 t	79,1 % (75 %)
Sonstige Batterien	29.620 t	76,2 % (50 %)	22.315 t	75,5 % (50 %)	17.424 t	83,8 % (50 %)
Gesamt	181.611 t		228.922 t		219.055 t	

\* gesammelte Menge, die einem Recycling zugeführt wurde, \*\* In Klammern: regulatorisch geforderte Mindestrecyclingeffizienz

Insbesondere für Lithium-Ionen-Batterien sind jedoch **neue Recyclingkapazitäten** zu schaffen. In Prognosen wird davon ausgegangen, dass sich das Marktvolumen von Lithium-Ionen-Batterien in Europa bis 2030 im Mittel verzehnfachen wird (vgl. Abbildung 6).<sup>81</sup>

Der wesentlichste Treiber ist in diesem Zusammenhang die sich sukzessive etablierende Elektromobilität (Elektrofahrzeuge, eBikes etc.), für die zweistellige Wachstumsraten prognostiziert werden. Aber auch Gerätebatterien (3C) sowie Lithium-Ionen-Batterien für Nutzfahrzeuge und Energiespeichersysteme tragen zum Marktwachstum bei. Aktuell wird geschätzt, dass rund 70 Kilotonnen Recyclingkapazitäten für Lithium-Ionen-Batterien in Europa zur Verfügung stehen (vgl. hierzu Ergebnisse des Fachgesprächs, S. 113). Dieser Wert ist sehr volatil, da der Recyclingmarkt für Lithium-Ionen-Batterien stark wächst und sich die neu entstehenden Recyclingstrukturen erst noch verstetigen müssen. Dem gegenüber stehen prognostizierte Mengen an

<sup>77</sup> Vgl. Umweltbundesamt (2021).

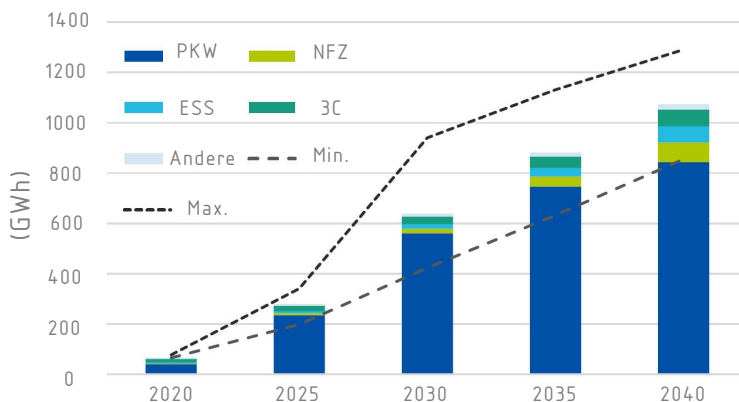
<sup>78</sup> Vgl. ZVEI - Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e. V. (2021).

<sup>79</sup> Vgl. Umweltbundesamt (2021).

<sup>80</sup> Der Rückgang um ca. 50.000 Tonnen Blei-Säure-Batterien von 2019 auf 2020 ist auf die Insolvenz eines Marktteilnehmers zurückzuführen, der in den Vorjahren in dieser Größenordnung Mengen meldete (Interview Umweltbundesamt, 06.05.2022).

<sup>81</sup> Vgl. Neef, C.; Schmaltz, T. und Thielmann, A. (2021), S. 21.

Lithium-Ionen-Batterien von rund 100 Kilotonnen im Jahr 2025 und 250 Kilotonnen im Jahr 2030, die einem Recycling zuzuführen sind.<sup>82</sup> Für Deutschland wird für 2030 geschätzt, dass sich die Rücklaufmenge an Lithium-Ionen-Batterien auf ca. 50 Kilotonnen (Spanne von Minimum 21 Kilotonnen bis Maximum 78 Kilotonnen) belaufen wird. Da jedoch insbesondere der Markt für Gebrauchtwagen innereuropäisch stark vernetzt ist und Schrotte in größerem Maßstab exportiert und importiert werden, ist diese Prognose eine grobe Vorabschätzung.<sup>83</sup>



PKW: Personenkraftwagen; NFZ: Nutzfahrzeuge; ESS: Energy storage system/stationäre Speicher; 3C: Computing, consumer, communication; Andere: eBikes, Scooter und sonstige Anwendungen

Abbildung 6: Nachfrageentwicklung von Lithium-Ionen-Batterien in Europa<sup>84</sup>

### 3.1.2 Gesetzliche Herausforderungen

Auf europäischer wie nationaler Ebene wurde **frühzeitig ein Handlungsbedarf identifiziert**, um adäquat auf das dynamische Marktwachstum insbesondere von Lithium-Ionen-Batterien zu reagieren.<sup>85</sup> Im Oktober 2017 wurde die europäische Batterie-Allianz ins Leben gerufen, um eine „vollständige, weltweit wettbewerbsfähige und nachhaltige Batterie-Wertschöpfungskette

<sup>82</sup> Vgl. Neef, C.; Schmaltz, T. und Thielmann, A. (2021), S. 22.

<sup>83</sup> Vgl. Bittner, A. et al. (2021), S. 30.

<sup>84</sup> © Fraunhofer ISI; vgl. Neef, C.; Schmaltz, T. und Thielmann, A. (2021), S. 21.

<sup>85</sup> Vgl. Halleux, V. (2022), S. 1.

in der EU<sup>86</sup> aufzubauen. Zusätzlich wurde im Mai 2018 im Rahmen des dritten Mobilitätspakets „Europa in Bewegung“ ein eigener strategischer Aktionsplan für Batterien veröffentlicht. Darin sind Schlüsselmaßnahmen entlang der gesamten Wertschöpfungskette des Ökosystems für Batterien gelistet.

Aufbauend auf der Batterie-Allianz und dem Aktionsplan wurde zudem im Dezember 2020 ein Vorschlag zur **Neuregelung der aktuell geltenden Batterierichtlinie** 2006/66/EG durch die Europäische Kommission angenommen. Am 9. Dezember 2022 haben sich das EU-Parlament und der Europäische Rat auf eine konkrete Regelung für die neue Batterierichtlinie geeinigt. Das Inkrafttreten der neuen Richtlinie wird für 2023 erwartet.

Die Revision ist Teil des Europäischen Green Deal und damit einhergehender Initiativen wie des neuen Aktionsplans für die Kreislaufwirtschaft und der neuen Industriestrategie.<sup>87</sup> Insbesondere der Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft priorisiert dabei den Umgang mit der ressourcenintensiven Wertschöpfungskette ‚Batterie‘.

Der Vorschlag betrachtet die gesamte Wertschöpfungskette ‚Batterie‘ und legt u. a. folgende **Vorgaben** fest<sup>88</sup>:

- Für wiederaufladbare Industriebatterien und Batterien für Elektrofahrzeuge mit internem Speicher und einer Kapazität > 2 kWh gilt:
  - Batteriehersteller müssen Vorgaben für die Verwendung von **verantwortungsvoll beschafften Rohstoffen** einhalten.
  - Batteriehersteller müssen eine Erklärung zu ihrem **CO<sub>2</sub>-Fußabdruck abgeben** (ab Januar 2026 ist dies auf der Batterie zu kennzeichnen und ab Juli 2027 müssen Höchstwerte für den CO<sub>2</sub>-Fußabdruck eingehalten werden).
  - Ab 2030 muss bei der Herstellung dieser Batterien ein **Mindestgehalt an recyceltem Kobalt, Blei, Lithium und Nickel** eingesetzt werden.

---

<sup>86</sup> Europäische Kommission (2022).

<sup>87</sup> Vgl. Halleux, V. (2022), S. 2.

<sup>88</sup> Vgl. Europäische Kommission (2020).

Dieser Mindestwert wird 2035 angehoben. Bereits ab 2027 ist der Gehalt an recycelten Rohstoffen anzugeben.

- Produkte sind durch die Herstellfirmen so zu gestalten, dass die **Batterien leicht entfernbar** sind. Die Funktionsfähigkeit der Geräte darf dadurch nicht beeinträchtigt sein.
- Die **Sammelquote** für Gerätebatterien soll **anhoben** werden – auf 63 Prozent im Jahr 2027 und 73 Prozent im Jahr 2030.

Der Vorschlag enthält weitere wesentliche Änderungen und wird als **Novum** in Bezug auf die gestellten **Anforderungen an die gesamte Wertschöpfungskette** ‚Batterie‘ bewertet.

Aus den vorgeschlagenen Änderungen ergeben sich jedoch weitere Fragestellungen und Herausforderungen für die Agierenden. Insbesondere in Bezug auf die zu erzielende Quote von Mindestgehalten an rezyklierten Rohstoffen ab 2030 herrschen Unsicherheiten. Die Quote ist u. a. abhängig von Faktoren wie der Verfügbarkeit von End-of-Life-Batterien, technischen Limitationen der Recyclingprozesse oder etwaigen illegalen Verbringungen, insbesondere von Elektrofahrzeugen. Über einen im Jahr 2027 geplanten Revisionsprozess sollen entstehende Konflikte jedoch aufgegriffen werden (vgl. hierzu Ergebnisse des Fachgesprächs, S. 96).

### 3.1.3 Herausforderungen in der Praxis

Der Markt für das Batterierecycling entwickelt sich aktuell rasant. Daraus ergeben sich marktwirtschaftliche Herausforderungen für Agierende – von der Beschaffung, über den Transport bis hin zur Entsorgung.

#### (a) Kritische Rohstoffe in Lithium-Ionen-Batterien

Die Europäische Kommission legte eine Einstufung kritischer Rohstoffe fest. Diese umfasst Rohstoffe, die nicht dauerhaft und sicher in Europa abgebaut werden können, entsprechend importiert werden müssen und eine wesent-

liche Rolle für die europäische Wirtschaft spielen. Insgesamt wurden 30 Rohstoffe als kritisch eingestuft, darunter **Lithium und Kobalt**, für die eine Versorgungssicherheit für den europäischen Raum nicht gewährleistet ist.<sup>89</sup>

Zudem wurde abgeschätzt, dass der globale kumulierte Bedarf an Kobalt und Lithium bis 2050 geringer ausfällt als die terrestrischen Reserven und Ressourcen (vgl. Tabelle 6).

**Tabelle 6: Bedarf, Reserven und Ressourcen von Lithium und Kobalt<sup>90, 91</sup>**

	Lithium	Kobalt
Globaler kumulierter Bedarf bis 2050	14 - 20 Mio. t	6 - 9 Mio. t
Global verfügbare Reserven (nach Stand der Technik wirtschaftlich abbaubar)	17 Mio. t	7 Mio. t
Global verfügbare Ressourcen (nach Stand der Technik noch nicht wirtschaftlich abbaubar)	80 Mio. t	25 Mio. t

Demnach ist zwar eine Rohstoffversorgung per se gegeben, allerdings bestehen starke Abhängigkeiten des europäischen respektive deutschen Marktes zu Ländern, in denen die Vorkommen geographisch zentriert sind. So kommt Lithium hauptsächlich in Chile, Australien, Argentinien und China vor, während die Hälfte der weltweiten Reserven an Kobalt aus der Demokratischen Republik Kongo stammen. Hier stehen die sozialen Bedingungen, unter denen der Abbau stattfindet, stark in der Kritik.<sup>92</sup>

Eine **Bewertung der Rohstoffkritikalität** gemäß der VDI Richtlinie 4800, Blatt 2 verdeutlicht diese Situation nochmals im Detail. Dreizehn verschiedene Indikatoren bemessen die Kritikalität von Lithium und Kobalt von gering (0) bis hoch (1). Zusätzlich wurde Nickel als ebenfalls relevanter Rohstoff für die Produktion von Batterien mit aufgeführt (vgl. Tabelle 7).

Die Kritikalitätsbewertung bestätigt die risikoreiche Versorgung der Rohstoffmärkte in Europa beziehungsweise Deutschland durch die zentrierten Vorkommen in Ländern wie dem Kongo, Chile und Argentinien.

<sup>89</sup> Vgl. Strutzberg, L.; Lange, U. und Frerichs, T. (2022).

<sup>90</sup> Vgl. Fluchs, S. (2021), S. 1.

<sup>91</sup> Vgl. U.S. Geological Survey (2020), S. 51 u. S. 99.

<sup>92</sup> Vgl. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (2021), S. III.

Tabelle 7: Rohstoffkritikalität von Lithium, Nickel und Kobalt nach VDI 4800, Blatt 2<sup>93</sup>

Kategorie	Indikator	Lithium	Nickel	Kobalt
Geologische, technische und strukturelle Indikatoren	Verhältnis von Reserven zu globaler Jahresproduktion	0	0,7	0,3
	Grad der Koppel-/Nebenproduktion	0	0,3	0,7
	Verbreitungsgrad funktionaler End-of-Life-Technologien	1	0,3	0,7
	Wirtschaftlichkeit von Lagerung und Transport	0	0	0
	Verbreitungsgrad natürlicher Vorkommen/Anbaugebiete	0	0	0
Geopolitische und regulatorische Kriterien	Herfindahl-Hirschman-Index Länderkonzentration der Reserven	1	0,7	0,7
	Herfindahl-Hirschman-Index Länderkonzentration der Produktion	1	0,3	1
	Politisches Länderrisiko	0,3	0,3	0,7
	Regulatorisches Länderrisiko	0,3	0,3	0,7
Ökonomische Kriterien	Herfindahl-Hirschman-Index der Unternehmen	0,7	0,3	0,3
	Grad der Nachfragesteigerung	0,3	0,3	0,3
	Technische Machbarkeit und Wirtschaftlichkeit von Substitutionen in Hauptanwendungen	0,7	1	1
	Annualisierte Preisvolatilität	0,7	1	1

Zudem werden ökonomische Kriterien für Lithium als risikoreich eingestuft. Für Lithium und Kobalt können in Lithium-Ionen-Batterien keine geeigneten Substitute verwendet werden, die Versorgungsengpässen entgegenwirken. Ebenso gestalten sich die Marktpreise sehr volatil und sorgen gleichfalls für Versorgungsunsicherheiten. **Lithium-Eisenphosphat-Batterien** benötigen hingegen für die Herstellung kein Kobalt. Sie werden daher als Alternative insbesondere für den Elektromobilitätsmarkt gesehen und bereits von Automarken wie Tesla oder BYD eingesetzt.<sup>94</sup>

<sup>93</sup> Vgl. VDI 4800 Blatt 2:2018-03, S. 64.

<sup>94</sup> Vgl. Adamas Intelligence (2022).



### Lithiumabbau in Deutschland<sup>95</sup>

Derzeit entsteht ein Lithium-Bergwerk im Osterzgebirge. Die entdeckte Lagerstätte soll bis zu 125.000 Tonnen Lithium enthalten und das derzeit größte Vorkommen in Europa sein. Die Lithiummenge entspräche somit rund 20 Millionen Fahrzeugen, die mit Batterien versorgt werden könnten.

Auch Thermalquellen zur Strom- und Wärmegewinnung sind gleichzeitig eine Lithiumquelle. Aus diesem Grund wurde in Bruchsal eine Pilotanlage zur Lithiumgewinnung errichtet. Die Sole ist reich an Lithium, liegt in einer Tiefe von 2.542 Metern und hat eine Temperatur von 131 °C. Pro Liter Sole sind rund 150 Milligramm Lithium enthalten. Aktuell wird eine Technologie entwickelt, mit der das Lithium aus der Sole gewonnen werden kann. Bei erfolgreicher Umsetzung können so rund 800 Tonnen Lithium pro Jahr gewonnen werden. Der deutschlandweite Bedarf an Lithium lässt sich damit zwar nicht decken, jedoch existieren im Norddeutschen Becken und im Oberrheingraben weitere Thermalquellen, die mithilfe dieser Technologie erschlossen werden können.

### (b) Verfügbarkeit von End-of-Life-Batterien

Entsprechend der Rohstoffkritikalität nach der VDI Richtlinie 4800, Blatt 2 (vgl. Tabelle 7) existiert eine geringe Verbreitung von funktionalen End-of-Life-Technologien für Lithium und Kobalt. Diese Recyclingstrukturen und Technologien befinden sich aktuell in der Entwicklung. Eine Hochskalierung dieser Strukturen ist jedoch erforderlich, um die Mengen an Batterien, die zukünftig dem Recycling zuzuführen sind, zu verarbeiten (vgl. hierzu Ergebnisse des Fachgesprächs, S. 99).

Den geforderten Recyclingkapazitäten steht die tatsächliche **Verfügbarkeit von End-of-Life-Batterien** gegenüber. Diese ist durch verschiedene Faktoren beeinträchtigt (vgl. Kapitel 4.1.3):

---

<sup>95</sup> Vgl. Kempkens, W. (2021).

- Insbesondere defekte Elektronik-Altgeräte inklusive der verbauten Lithium-Ionen-Akkus werden **in Haushalten gelagert**. Allein für Smartphones wird das Aufkommen auf mehr als 200 Millionen Altgeräte geschätzt<sup>96</sup>.
- Kleine Elektro-Altgeräte inklusive der verbauten Lithium-Ionen-Akkus werden über den **Restmüll entsorgt**. Eine Analyse zeigte, dass rund 86.000 Tonnen pro Jahr an Elektro-Altgeräten und geschätzt 500 Tonnen Sekundärbatterien im Restmüll enden.<sup>97</sup>
- Rund drei Millionen Fahrzeuge werden in Deutschland jährlich stillgelegt. Zwei Drittel davon werden ins **Ausland exportiert** und dort wieder in Betrieb genommen.<sup>98</sup> Dieser Umstand lässt sich perspektivisch auf die künftigen Elektro-Altautos übertragen.
- Ein Großteil der geschätzten Mengen an zu recycelnden Lithium-Ionen-Batterien sind mittelfristig **Produktionsausschüssen** zuzuschreiben, die beim Anfahren bis zum sicheren Betrieb einer Zellfertigung entstehen. Diese Batterien sind per Definition keine End-of-Life-Batterien.<sup>99</sup>

Insbesondere Exporte ins außereuropäische Ausland bedeuten für die Wertschöpfungskette ‚Batterie‘ einen Ressourcenverlust. Dahingehend sind weiterhin Anstrengungen zu unternehmen, um insbesondere Lithium-Ionen-Batterien im Wertstoffkreislauf zu halten und für die Recyclinginfrastruktur verfügbar zu machen.

---

<sup>96</sup> Vgl. Bitkom e.V. (2021).

<sup>97</sup> Vgl. Dornbusch et al. (2020), S. 97.

<sup>98</sup> Vgl. Umweltbundesamt (2022b).

<sup>99</sup> Vgl. Neef, C.; Schmaltz, T. und Thielmann, A. (2021), S 23.

### Diskussion um die Einführung einer Pfandpflicht

Der Vorschlag zur Batterierichtlinie der Europäischen Kommission enthält derzeit keine Vorgaben zu einem verpflichtenden Batteriepfand. Ein solches wurde vom Binnenmarktausschuss gefordert, fand jedoch keine Mehrheit im Europäischen Parlament.

Eine kommende Studie soll daher die praktischen Umsetzungsmöglichkeiten und den Nutzen eines solchen Pfands auf Batterien untersuchen.<sup>100</sup>

Ein Pfandsystem für Batterien bringt sowohl Vor- als auch Nachteile mit sich. Es kann die Rücknahmestrukturen stärken und die Rücknahmemengen erhöhen. Brände, ausgelöst durch falsch entsorgte Lithium-Ionen-Batterien, könnten so ebenfalls verringert werden. Andererseits kann der bürokratische Aufwand steigen und bestehende Rücknahmesysteme könnten beeinträchtigt sein.

So ergab eine Umfrage zum Thema Pfand auf Smartphones, dass sich 53 Prozent der Befragten in Deutschland gegen ein solches Pfand aussprechen, während 43 Prozent dafür seien. 19 Prozent der Befragten würden die Rückgabe des eigenen Smartphones gar nicht in Betracht ziehen. Der Großteil der Befragten (45 Prozent) benannte eine Pfandhöhe von 25 Euro als ausreichenden Anreiz für die Rückgabe ausgedienter Handys.<sup>101</sup> Eine weitere Umfrage zeigt hierzu ein differenzierteres Bild. So bewerten unter den Befragten 51 Prozent die Einführung eines Pfandsystems für Smartphones als sehr gut und 31 Prozent gut. Nur elf Prozent sprachen sich grundsätzlich gegen ein Pfandsystem aus.<sup>102</sup>

Auf Grundlage des Vorschlags der Batterierichtlinie wird es vorerst keine flächendeckenden Vorgaben zur Einführung eines Batteriepfands geben. Allerdings werden in weiteren geplanten Studien die Machbarkeit und Sinnhaftigkeit einer künftigen Umsetzung untersucht.

---

<sup>100</sup> Vgl. Umwelt- und Energie Report (2022).

<sup>101</sup> Vgl. Bitkom e. V. (2021).

<sup>102</sup> Vgl. Jongbloed, K. und Kessens, L. (2021).

### (c) Potenzielle Brandgefahren durch Lithium-Ionen-Batterien

Batterien auf Lithium-Ionen-Basis können sich unter bestimmten Bedingungen selbst entzünden. Beispielsweise können durch Schläge Dysfunktionen auftreten, die zu einem Kurzschluss und einer verstärkten Hitzeentwicklung führen. Dadurch ist es möglich, dass der Elektrolyt erhitzt und verdampft. Das kann wiederum ein typisches Aufblähen von Lithium-Ionen-Batterien und gegebenenfalls eine Entzündung mit anschließender Explosion nach sich ziehen. Eine Sonderform der Selbstentzündung ist der sogenannte **Thermal Runaway**. Die Akku-Kapazität wird in Form von Wärme in defekten Akkuzellen freigesetzt. Nachbarzellen werden dabei miterhitzt und tragen die Hitzeentwicklung wiederum an Nachbarzellen weiter. Dieser Prozess kann, einmal in Gang gesetzt, nicht mehr unterbrochen werden und führt zum Brand der gesamten Batterie.<sup>103</sup>

Kurzschlüsse in Lithium-Ionen-Batterien entstehen oftmals durch die Bildung sogenannter Dendriten an der negativen Elektrode – u. a. aufgrund von Auf- und Entladen der Batterie. Die Dendriten bilden sich an bestimmten Verunreinigungen oder an strukturellen Inhomogenitäten auf der Lithium-Oberfläche und wachsen von dort astartig weiter<sup>104</sup>. Beim Erreichen der Gegenelektrode können sie in Anwesenheit des entflammaren Elektrolyten einen Kurzschluss verursachen. In der Folge beginnen die Lithium-Ionen-Batterien zu brennen.<sup>105</sup> Der Transport von Lithium-Ionen-Batterien wird daher als **Gefahrguttransport** eingestuft, da auch Transporterschütterungen zu Beschädigungen führen und in der Folge Brände verursachen können. An solche Transporte sind daher nach Europäischem Übereinkommen über die internationale Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße (ADR) feste Anforderungen gestellt, die insbesondere für die Entsorgungsbranche einen umfänglichen, aber notwendigen behördlichen Aufwand bedeuten.<sup>106</sup>

---

<sup>103</sup> Vgl. LionCare GmbH (2022).

<sup>104</sup> Vgl. Dürfeld, K. (2021).

<sup>105</sup> Vgl. Juschkat, K. (2021).

<sup>106</sup> Vgl. Stiftung GRS Batterien (2020).

### Transportlösungen für Lithium-Ionen-Batterien

Für den Transport von Lithium-Ionen-Batterien werden verschiedene Lösungen angeboten. Diese entsprechen den rechtlichen Vorgaben und verhindern das unkontrollierte Abbrennen der Batterien während der Lagerung und des Transports. Die Behältnisse zeichnen sich beispielsweise durch eine Isolation aus, die wärmedämmend wirkt und vor Hitze schützt, durch eine Abdichtung, die den Flüssigkeitseintritt von außen verhindert, und durch unbrennbares, saugfähiges Polstermaterial.<sup>107</sup>

#### (d) Fehlende Absatzmärkte für Rezyklate

Derzeit entwickeln sich zahlreiche neue innovative Recyclingverfahren. Die Endprodukte aus diesen Recyclingverfahren für Batterien und Akkus, die einer erneuten Produktion von Batterien zugeführt werden, entsprechen einem **Battery Grade Material**, dem sogenannten batteriegerechten Material.

Aktuell können aus den Recyclingprozessen u. a. folgende Materialien wiedergewonnen werden, wie aus Tabelle 8 ersichtlich wird:

Tabelle 8: Zurückgewonnene Materialien aus dem Batterierecycling<sup>108</sup>

Unternehmen	zurückgewonnene Rohstoffe	Input
Accurec	Lithium, Kupfer, Eisen, Nickel, Kobalt, Aluminium, Plastik	Li-Ion, Ni-Cd, Ni-Mh
Duesenfeld GmbH	Lithium, Kobalt, Nickel, Eisen, Kupfer, Aluminium,	Li-Ion, LFP
Eramet	Lithium, Kobalt, Nickel, Eisen, Kupfer, Aluminium,	Li-Ion, Alk/Zn-C
Redux	Eisen, Aluminium, Kupfer, Plastik	Li-Ion, Alk/Zn-C

Die Metalle liegen nach ihrer hydrometallurgischen Aufbereitung in Form von Sulfaten – also als Salze – vor. Andere Bestandteile, insbesondere die Elektrolytlösung oder Separatorfolien, können zwar bereits rückgewonnen werden, sind jedoch **nicht in ausreichend hohen Mengen** vorhanden, um sie der Industrie zurückzuführen. Hier finden jedoch Gespräche mit herstellenden Unternehmen statt sowie generelle Diskussionen bezüglich eines

<sup>107</sup> Vgl. Stiftung GRS Batterien (2022).

<sup>108</sup> Vgl. Baltac, S. und Slater, S. (2019), S. 37.

zentralen oder dezentralen Recyclings, um diese Wertstoffströme ebenfalls zu erschließen.

### (e) Secondhand-Batterien

Ein wesentlicher Aspekt beim Einsatz von Lithium-Ionen-Batterien in der E-Mobilität umfasst ihre Lebensdauer und Kapazität. Je nach Pflege der Batterien können sie zwischen fünf und zehn Jahren eingesetzt werden. Ihre Kapazität lässt jedoch im Zuge der Nutzung nach. Allerdings verfügen Lithium-Ionen-Akkus nach dem Ausbau aus E-Fahrzeugen oftmals **noch über circa 80 Prozent** ihrer ursprünglichen Leistung.

Die Weiterverwendung dieser Lithium-Ionen-Akkus bietet daher eine attraktive Alternative zu einem sofortigen Recycling. So sind in den letzten Jahren immer häufiger Projekte gestartet, die alte Fahrzeugbatterien beispielsweise **als Energiespeicher** einsetzen.

In einem solchen Fall wurde ein großtechnischer Stromspeicher vollständig aus alten Lithium-Ionen-Batterien gefertigt, um die Lastspitzen eines Entsorgungsunternehmens auszugleichen. Die Pilotanlage wurde nach einer mehr als 3-jährigen Einsatzzeit an einem neuen Standort installiert und optimiert dort nun den Eigenstromverbrauch aus einer Photovoltaikanlage. Zusätzlich zu dem Entwurf und der Errichtung der Pilotanlage wurden Analysegeräte zur Zustandserhebung der alten Fahrzeugbatterie entwickelt. Eine **Überprüfung des State of Health** ist wesentlich, um über eine ressourceneffiziente Weiterverwendung zu entscheiden.<sup>109</sup>

## 3.2 Stand der Technik

Aufgrund der Relevanz von Lithium-Ionen-Batterien im aktuellen Kontext wird im Folgenden auf deren Recyclingrouten eingegangen. Die Recyclingschritte bestehen dabei im Wesentlichen aus Deaktivierung, Demontage, mechanischer Aufarbeitung, Pyrometallurgie, Hydrometallurgie oder Pyrolyse

---

<sup>109</sup> Vgl. Saubermacher (2022).

und können in unterschiedlicher Weise angeordnet werden. Eine Übersicht über mögliche Prozessvariationen bietet Abbildung 7:<sup>110</sup>

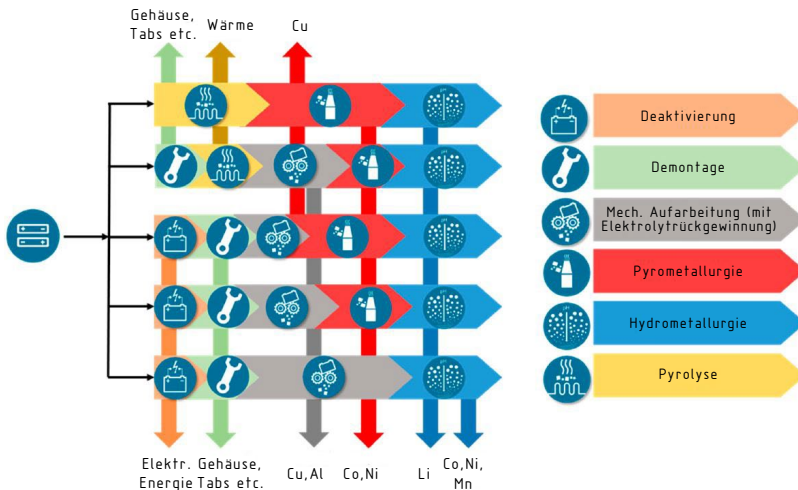


Abbildung 7: Prozessvariationen Batterierecycling<sup>111</sup>

Die **Deaktivierung und die Demontage** der Batteriezellen ist den diversen Aufbereitungsschritten vorgeschaltet. Die Demontage erfolgt derzeit noch händisch. Aufgrund der Zunahme von bspw. Cellpacks ist jedoch davon auszugehen, dass entweder halb- bzw. vollautomatisierte Demontageanlagen oder eine gänzliche Zufuhr in Schredderlinien zukünftig eine übergeordnete Rolle spielen werden.<sup>112</sup>

Die **mechanische Aufarbeitung** umfasst oftmals einen Zerkleinerungsschritt (Schreddern) unter Vakuum, Schutzgasatmosphäre (Ar/N<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>), in flüssigem Stickstoff oder in einer Wasser-Salz-Lösung. Dieser Schritt liegt in den hochreaktiven Inhaltsstoffen der Batterien begründet. Anschließend erfolgen zumeist eine Vakuum-Destillation sowie ein Trockenschritt, um die

<sup>110</sup> Vgl. Doose, S. et al. (2021), S. 3.

<sup>111</sup> CC BY 4.0 Doose, S. et al. (2021), S. 3.

<sup>112</sup> Vgl. Neef, C.; Schmaltz, T. und Thielmann, A. (2021), S. 28.

Elektrolytlösung zur Weiterverwendung vorzubereiten. Über eine anschließende mechanische Auftrennung werden die metallischen Bestandteile wie beispielweise Stahl, Kupfer oder Aluminium sowie ein Gemisch aus Elektrodenmaterialien, Bindern, Additiven und Restbestandteilen des Elektrolyten, die sogenannte Schwarzmasse, separiert.<sup>113</sup>

Im Zuge des **pyrometallurgischen Prozesses** werden die Lithium-Ionen-Batterien in ein Schmelzaggregat gegeben, in dem sie verschiedene Temperaturbereiche durchlaufen. Die organischen Bestandteile verdampfen, während die Metallverbindungen bei höheren Temperaturen aufgeschmolzen und die Kobalt-, Nickel- und Eisen-Verbindungen zu Metallen reduziert werden. Organische Bestandteile und das Graphit werden oxidiert und gehen als Wertstoffe verloren, liefern aber thermische Energie für den Prozess. Manganverbindungen, Lithium und Aluminium enden in der Schlacke, während Kupfer, Kobalt, Nickel und Eisen eine Legierung bilden. Diese Wertstoffe können anschließend in einem hydrometallurgischen Prozess zurückgewonnen werden.<sup>114</sup>

Der **hydrometallurgische bzw. nasschemische Prozess** dient der Auftrennung der aus der Pyrometallurgie und/oder der mechanischen Aufbereitung stammenden Stoffgemische. Hierbei handelt es sich entweder um die hydrometallurgische Trennung von Kupfer, Nickel und Kobalt nach der Pyrometallurgie oder die Aufbereitung der Schwarzmasse. Der Prozess ist insgesamt ökologisch unbedenklicher als der pyrometallurgische Prozess, da letzterer durch hohe Temperaturen energieintensiv ist und eine Abgasreinigung erforderlich macht. Allerdings wird beim hydrometallurgischen Prozess eine Abwasserreinigung zwingend notwendig.<sup>115</sup>

### 3.3 Innovative Recyclingtechnologien

Das rasante Wachstum des Batteriemarktes - insbesondere von Lithium-Ionen-Batterien - bedingt eine (Weiter-)Entwicklung des Lithium-Ionen-Batterierecyclings. Die Batterieforschungsförderung der Bundesregierung fördert

---

<sup>113</sup> Vgl. Neef, C.; Schmaltz, T. und Thielmann, A. (2021), S. 29f.

<sup>114</sup> Vgl. Neef, C.; Schmaltz, T. und Thielmann, A. (2021), S. 30f.

<sup>115</sup> Vgl. Neef, C.; Schmaltz, T. und Thielmann, A. (2021), S. 31f.



diesen Schritt. Das Dachkonzept **Forschungsfabrik Batterie** ist eine in diesem Zusammenhang groß angelegte Fördermaßnahme mit verschiedenen Elementen.<sup>116</sup> Dazu zählt auch das Kompetenzcluster Recycling und Grüne Batterie (greenBatt), das Lösungsstrategien zu den Herausforderungen im End-of-Life von Batterien fokussiert.<sup>117</sup> Einzelne Entwicklungen und Innovationen (auch unabhängig vom Kompetenzcluster Recycling und Grüne Batterien) werden im Folgenden kurz vorgestellt.

An dieser Stelle sei darauf verwiesen, dass die Entwicklungen der Recyclingtechnologien auch immer vor dem **Hintergrund der Digitalisierung** zu verfolgen sind. So beschäftigen sich aktuell namhafte Forschungsprojekte wie „Battery Pass“<sup>118</sup> oder „CIRPASS“<sup>119</sup> – auch im Austausch mit der Initiative Catena X<sup>120</sup> – mit der Entwicklung von Prototypen eines **digitalen Produktpasses**, der die Verfolgbarkeit der Batterien und wesentlicher Informationen zur Batterie entlang der gesamten Wertschöpfungskette gewährleisten und bereitstellen soll. Ziele sind die Optimierung sowie effiziente Schließung der gesamten Batterie-Wertschöpfungskette.

### 3.3.1 Demontage von Batterien und Akkumulatoren

Die Demontage ist der erste Prozessschritt einer stofflichen Verwertung von insbesondere Lithium-Ionen-Batterien. Vor allem die automatisierte bzw. halbautomatisierte Zerlegung von Batteriezellen wird aktuell untersucht. Das Forschungsprojekt **DeMoBat (Industrielle Demontage von Batteriemodulen und E-Motoren)** fokussiert dafür die Machbarkeit „industrieller und automatisierter Demontage von Batteriemodulen und E-Antriebsaggregaten unter Berücksichtigung wirtschaftlicher und regulatorischer Rahmenbedingungen“<sup>121</sup>. Ziel des Verbundprojektes ist die Entwicklung von vier Demonstratoren.

---

<sup>116</sup> Vgl. Kompetenznetzwerk Lithium-Ionen-Batterien e. V. (2018).

<sup>117</sup> Vgl. greenBatt (2021d).

<sup>118</sup> Vgl. The Battery Pass (2022).

<sup>119</sup> Vgl. CIRPASS (2023).

<sup>120</sup> Vgl. Catena-X (2023).

<sup>121</sup> Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA (2022).

- Demonstrator 1 dient dabei der Validierung und Veranschaulichung einer industriellen und (teil-)automatisierten Demontage von Batteriemodulen aus Batteriesystemen.
- Demonstrator 2 dient der Validierung und Veranschaulichung einer industriellen und (teil-)automatisierten Demontage von Batteriezellen aus Batteriemodulen.
- Demonstrator 3 dient der Demontage einzelner Batteriezellen sowie deren stofflicher Fraktionierung. Zusätzlich wird die Wiedereinsatzmöglichkeit der zurückgewonnenen Kathoden- und Anodenmaterialien für die Herstellung neuer Batteriezellen überprüft.
- Demonstrator 4 dient der Validierung und Veranschaulichung einer industriellen und (teil-)automatisierten Demontage von E-Antriebsaggregaten<sup>122</sup>.

Die Ergebnisse und Herausforderungen des Projektes wurden im Rahmen des Fachgesprächs „Innovative Recyclingtechnologien von Industriebatterien“ (vgl. hierzu Teil II der vorliegenden Kurzanalyse, Seite 100) vorgestellt.

Das Projekt **DemoSens (Digitalisierung einer automatisierten Demontage und sensorgestützten mechanischen Aufbereitung von Lithium-Ionen-Batterien für ein hochwertiges Recycling)** untersucht unterdessen die Machbarkeit einer automatisierten, sensorgestützten und digitalisierten Demontage von Lithium-Ionen-Batterien. Ziel ist es, ein Robotersystem als Pilotanlage zu entwickeln, das eine Demontage bis auf Modul- bzw. Zellebene durchführt und eine sensorbasierte Materialerkennung und damit eine Sortierung in Fraktionen ermöglicht. Es sollen in diesem Zusammenhang sogenannte Machine-Learning-Verfahren entwickelt werden, die eine selbstständige und selbstregulierende Zerlegung gewährleisten. Zusätzlich fördert der Abgleich der Informationen aus Demontage und folgender mechanischer Aufbereitung eine iterative und wechselseitige Anpassung der

---

<sup>122</sup> Vgl. Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA (2022).

Prozessschritte und erhöht entsprechend die Effizienz. Ergebnisse werden zum Projektlaufzeitende am 30.09.2023 erwartet.<sup>123</sup>

Die Ergebnisse - insbesondere des ersten Projektes - verweisen auf die Relevanz einer **recyclinggerechten Produktgestaltung von Batteriemodulen**. Der aktuelle Trend hin zu verschweißten und verklebten Batteriemodulen erschwert letztlich eine effiziente Demontage. Hinzu kommt, dass eine Vielzahl an Batterietypen mit unterschiedlichen Zellformen und vielfältiger Zellchemie am Markt verfügbar sind, die ein effizientes Demontieren von Batteriemodulen ebenfalls verkomplizieren. Hier sind die herstellenden Unternehmen aufgefordert, die Recyclinggerechtigkeit bereits im Produktdesign mitzudenken.

### 3.3.2 Recycling von Batterien und Akkumulatoren

Im Batterierecycling sind bereits einige Marktteilnehmende mit ihren Technologien etabliert und ebenfalls stark in Forschungsaktivitäten integriert. Letzteres unterstreicht die Notwendigkeit, bestehende Prozesse kontinuierlich weiterzuentwickeln, um auf die sich schnell entwickelnden Zelltypen flexibel reagieren und entsprechend die Recyclingquote erhöhen zu können.

Die Accurec Recycling GmbH recycelt beispielsweise seit mehr als 27 Jahren sämtliche Arten an wiederaufladbaren Batterien und hat 2016 einen neuen Standort für das Recycling von Lithium-Ionen-Batterien (Jahreskapazität: ca. 3.000 Tonnen pro Jahr) geschaffen. Die Batterien werden dort sortiert, zerlegt und - je nach Bedarf - entladen. Über eine thermische Behandlung in einem Drehrohrofen werden die organischen Bestandteile gespalten und pyrolysiert. Dieser Prozess erfolgt bei maximal 600 °C, damit unedle Metalle wie zum Beispiel Aluminium nicht oxidieren. Zusätzlich findet eine Abgasbehandlung über einen Nachbrenner und ein Löschesystem statt, wobei die überschüssige Energie nach einer Umwandlung in Hochdruckdampf für weitere industrielle Prozesse zur Verfügung steht. Die anschließende mechanische Behandlung trennt die pyrolysierten Batteriezellen über mehrere Trennmechanismen in eine Stahlfraction, eine Kupfer-Aluminium-Fraction und in ein kobalt- und nickelreiches Elektrodenpulver. Die Produkte sollen im Anschluss an Hütten sowie weiterverarbeitende Industrien weitergeleitet

---

<sup>123</sup> Vgl. greenBatt (2023).

werden. Der Prozess wird aktuell vornehmlich **über Forschungsprojekte** ausgebaut und verfeinert.

Auch weitere Beteiligungen an Forschungsprojekten zielen insbesondere auf die Verbesserung der Rückgewinnungsquoten kritischer Elemente wie Kobalt ab.<sup>124</sup>

- Das einjährige Forschungsprojekt **Chemikalienfreie Lithiumrückgewinnung aus Lithium-Ionen-basierten Altbatterien (CLIMA)** zielt auf die Entwicklung von innovativen Extraktions- und Raffinationsmethoden zur Gewinnung eines hochwertigen Lithiumsalzes unter minimalem Betriebsmitteleinsatz ab, das als batteriegerechtes Material der Zellproduktion zugeführt werden kann.<sup>125</sup> Zu diesem Zweck soll eine Anlage zur Lithiumrückgewinnung und -aufreinigung errichtet und in die Prozesskette des Unternehmens integriert werden.<sup>126</sup>
- Das großangelegte Forschungsprojekt **„Material Effizientes Recycling für die Circular Economy von Automobilspeichern durch Technologie ohne Reststoffe“ (Mercator)** setzt auf die Untersuchung eines kontrollierten, energieneutralen Pyrolyseprozesses und einer anschließenden hydro-mechanischen Trennung der beinhaltenen Sekundärrohstoffe. Auf diese Weise soll Lithium zurückgewonnen und wiedergewinnbares Graphit überprüft werden. Ziel ist es, hier eine Recyclingquote von über 70 Prozent zu erreichen.<sup>127</sup> Das Projekt baut dabei auf den Ergebnissen und Erkenntnissen des Vorgängerprojektes **„Demonstrationsanlage für ein kostenneutrales, ressourceneffizientes Processing ausgedienter Li-Ion Batterien der Elektromobilität (EcoBatRec)“** auf, im Zuge dessen u. a. eine autotherme Vakuumpyrolyse für Verfahrensabläufe zur Zerkleinerung, Klassierung, Sichtung und Trennung der Materialfraktionen entwickelt wurde.<sup>128</sup>

---

<sup>124</sup> Vgl. Sojka, R.; Pan, Q. und Billmann, L. (2020), S. 6.

<sup>125</sup> Vgl. Land.NRW (2021), S. 2.

<sup>126</sup> Vgl. ACCUREC Recycling GmbH (2022).

<sup>127</sup> Vgl. ACCUREC Recycling GmbH (2022).

<sup>128</sup> Vgl. Erneuerbar mobil (2022).

- Das Forschungsprojekt „**First of a kind commercial compact system for the efficient recovery of cobalt designed with novel integrated leaching technologies (CROCODILE)**“ mit insgesamt 24 Projektmitwirkenden beschäftigt sich mit der (Weiter-)Entwicklung von Aufbereitungsverfahren des ressourcenkritischen Kobalts (vgl. hierzu Kapitel 3.1.3 (a)). Pyro- sowie hydrometallurgische, biologische und elektrometallurgische Technologien stehen im Forschungsfokus.<sup>129</sup> So soll beispielsweise eine Pilotanlage über das Solventextraktionsverfahren (SX) Kobaltkonzentrate aus der Scharzmasse in verkaufsfähige Kobaltsalze überführen.<sup>130</sup>

Ein weiteres Unternehmen, die Duesenfeld GmbH, betreibt ein patentiertes Verfahren, das eine stoffliche **Verwertungsquote von rund 91 Prozent** erreicht. Der Prozess baut auf den Ergebnissen und Erkenntnissen der Forschungsprojekte **Lithorec I und Lithorec II** auf und wurde als Spin-off in die Praxis überführt. Der Prozess beginnt mit einer Tiefenentladung. Der rückgewonnene Strom wird zum Betrieb der Prozessmaschinen eingesetzt und ins Stromnetz eingespeist. Es erfolgt – nach entsprechender Lagerungszeit – eine spannungsfreie Demontage, wobei bereits sortenreine Fraktionen wie Aluminium und Kupfer aussortiert werden. Die Zerkleinerung findet unter Inertgas ( $N_2$ ) statt; die Vakuumtrocknung erfolgt im Niedertemperaturverfahren bei maximal 50 °C. Dadurch entstehen keine Flourwasserstoffe und eine energieintensive Gaswäsche kann vermieden werden. Die getrockneten Batteriefragmente können im Anschluss mithilfe verschiedener Trennmechanismen zurückgewonnen werden. Hierzu zählen Aluminium, Kupfer, Eisen, Kunststoffolie sowie die Schwarzmasse. Abschließend wird – derzeit noch im Pilotmaßstab – ein hydrometallurgischer Prozess betrieben, der als Endprodukte Nickelsulfat ( $NiSO_4$ ), Kobaltsulfat ( $CoSO_4$ ), Mangansulfat ( $MnSO_4$ ), Lithiumcarbonat ( $Li_2CO_3$ ) und Graphit in Batteriequalität produziert. Das Verfahren kann alle Typen von Lithium-Ionen-Batterien wirtschaftlich recyceln und verarbeitet rund 500 Kilogramm Material pro Stunde.<sup>131</sup> Weitere Forschung sowie eine sukzessive Hochskalierung des Hydrometallurgieprozesses sind derzeit in Arbeit. Zusätzliche Informationen zum Pro-

---

<sup>129</sup> Vgl. Crocodile Project (2018).

<sup>130</sup> Vgl. ACCUREC Recycling GmbH (2022).

<sup>131</sup> Vgl. Duesenfeld GmbH (2022).

zess können dem Fachgespräch „Innovative Recyclingtechnologien von Industriebatterien“ (vgl. hierzu Teil II der vorliegenden Kurzanalyse, Seite 116) entnommen werden.

Die Redux GmbH recycelt Batterien und setzt bei der Umsetzung auf die Vision von Zero Waste. Durch das Verwertungsverfahren können aktuell **Verwertungsquoten von 95 Prozent der enthaltenen Metalle** erreicht werden. Der Prozess beginnt auch hier mit einer Entladung, bei der die Energie in das Betriebsnetz eingespeist wird. Mittels manueller Demontage werden anschließend Kunststoffe, Kabel, elektronische Komponenten und Aluminium aussortiert. Über eine thermische Behandlung erfolgt die Abtrennung u. a. des Elektrolyten sowie des Separators. Auch Aluminiumableiterfolien können durch die spezielle Verfahrensführung gewonnen werden. Anschließend findet die Abtrennung einer Eisen-, einer Aluminium- und einer Aluminium-Kupfer-Fraktion mithilfe einer mechanischen Aufbereitung statt. Die gewonnene Schwarzmasse zeichnet sich durch eine hohe Reinheit aus und kann direkt einem hydrometallurgischen Prozess zugeführt werden.<sup>132</sup> Die entwickelten Prozesse basieren ebenfalls auf intensiver Forschungsarbeit. Aktuell ist das Unternehmen in den Forschungsprojekten CROCODILE und „**Future Lithium Ion Battery Recycling for Recovery of Critical Raw Materials (FuLiBatterR)**“ aktiv involviert. Letzteres untersucht die effiziente Rückgewinnung von kritischen Rohstoffen wie Lithium, Phosphor, Kobalt, Silizium und Graphit sowie die wirtschaftlich relevanten Metalle Kupfer, Nickel und Mangan.

Die aufgeführten Beispiele zeigen, dass das Recycling von Lithium-Ionen-Batterien stark an Forschungsaktivitäten geknüpft ist und im aktuellen Kontext einer raschen und vor allem notwendigen Weiterentwicklung unterliegt. Vor diesem Hintergrund wurde im **Projekt „Demonstrationszentrum Batterie-Recycling“** die technische und wirtschaftliche Konzeption eines Recycling-Zentrums für Lithium-Ionen-Batterien inklusive aller gängigen Behandlungsschritte sowie der entsprechenden Wertschöpfungsarchitektur erstellt. Das Demonstrationszentrum soll die vorindustrielle Forschung in den Blick nehmen und der Generierung von notwendigem Verfahrenswissen zur Weiterentwicklung des Recyclings von Lithium-Ionen-Batterien dienen. Die

---

<sup>132</sup> Vgl. Redux GmbH (2022).

Umsetzung der **Demonstrations-, Erprobungs- und Forschungsanlage zum Batterierecycling** ist aktuell in der politischen Diskussion bzw. im Planungsprozess.<sup>133, 134</sup>

Weitere Aktivitäten im Bereich der Weiterentwicklung des Lithium-Ionen-Batterierecyclings sind überblicksartig in Tabelle 9 dargestellt. Hierbei handelt es sich lediglich um einen kleinen Auszug weiterer Forschungsprojekte. Weitere Projekte von Relevanz und Interesse sind u. a. auf den Internetseiten des Kompetenzclusters Recycling & Grüne Batterie sowie der Projektdatenbank des Batterieforums Deutschland nachvollziehbar.<sup>135, 136</sup> Die Vielfalt der Aktivitäten unterstreicht unterdessen das derzeitige technologische Entwicklungspotenzial des Batterierecyclings.

---

<sup>133</sup> Vgl. Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule (RWTH) Aachen (2021).

<sup>134</sup> Vgl. Land Nordrhein-Westfalen (2022).

<sup>135</sup> Vgl. greenBatt (2021f).

<sup>136</sup> Vgl. Batterieforum Deutschland (2022).

Tabelle 9: Innovative Entwicklungen im Batterierecycling

Projekt	Kurzerläuterungen zu den Inhalten	Quelle
Graphitrückgewinnung durch Schaumflotation	Am Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf (HZDR) wurde die Rückgewinnung von Graphit aus Altbatterien untersucht. Dazu wurde ein Konzept entwickelt, das die Methode der Schaumflotation anwendet. Dies ist ein bereits etablierter Prozess für die Mineralienabtrennung von taubem Gestein. Trennmerkmale für die Schaumflotation sind Partikel- und Oberflächeneigenschaften wie Morphologie und Größe. Da der Prozess über die selektive Hydrophobierung erfolgt, können so die Mineralien über ihre wasserabweisende Eigenschaft und die Fähigkeit der Anhaftung an Gasblasen über den Schaum ausgetragen werden. <sup>137</sup>	Vanderbruggen, HZDR (2021), Pressemitteilung
Rückgewinnung von aktiven Kathodenmaterialien durch Schaumflotation	Die aktiven Kathodenmaterialien können durch ein direktes Recycling abgetrennt werden, wodurch ihre elektrochemische Leistung erhalten bleibt. Das Projekt untersuchte den Einsatz des Schaumflotationsverfahrens zur Trennung von unbehandeltem Lithium-Nickel-Mangan-Kobalt-Oxid und einem Lithium-Mangan-Oxid. Es konnte nachgewiesen werden, dass durch mehrere Stufen des Trennungsprozesses eine 95-prozentige Abtrennung des Lithium-Nickel-Mangan-Kobalt-Oxids sowie des Lithium-Mangan-Oxids bzw. die Anreicherung dieser im Schaumprodukt möglich war. Die Methode ist somit eine effektive und kostengünstige Trennmethode für das direkte Recycling gemischter Kathodenzusammensetzungen. <sup>138</sup>	Folayan et al. (2021), Energy Technology
Digitalisierung mechanischer Sortierprozesse beim Batterierecycling	Nach den Trennprozessen liegen die Materialien der Lithium-Ionen-Batterien als Bruchstücke vor. Das Projekt entwickelt eine Messtechnik, die die Eigenschaften des Schredderguts für jedes Bruchstück on-line und in-line erfassen soll. In Kombination mit Bilddaten (spektroskopische bzw. hyperspektrale Informationen) werden so große Datensätze gewonnen. Sie sollen über maschinelles Lernen so verarbeitet werden, dass ingenieurtechnische Zusammenhänge über die Partikelart und -form sowie die Zusammensetzung gezogen werden können. Die zu entwickelnde Mess- und Regelungstechnik soll entlang der gesamten Recyclingkette zur Qualitätsüberwachung und Datenakquise angewandt werden. <sup>139</sup>	GreenBatt (2022), Vorstellung der GreenBatt-Projekte: DIGISORT
Regenerierung von Lithium-Mangan-Oxid-Kathoden durch hydrothermale Reaktion in Lithaltiger Lösung	Die Studie zeigt auf, dass über eine hydrothermale Reaktion in einer lithiumhaltigen Lösung eine degradierte Lithium-Mangan-Oxid-Kathode regeneriert werden kann. Über das Verfahren ist es möglich, die Stöchiometrie und die Mikrophasenreinheit des Kathodenmaterials wiederherzustellen und für einen erneuten Einsatz in der Batteriefertigung einzusetzen. Im Rahmen einer Lebenszyklusanalyse konnte nachgewiesen werden, dass diese einstufige Regeneration gegenüber pyro- und hydrometallurgischen Prozessen ökologische und wirtschaftliche Vorteile bietet. <sup>140</sup>	Gao et al. (2020), Applied Materials & Interfaces
Hydrometallurgischer Ansatz für das vollständige Recycling von Lithium-Ionen-Batterien	Das Projekt zielt darauf ab, das Lithium aus der Schwarzmasse zurückzugewinnen. Dazu wird Kohlenstoffdioxid eingesetzt, das zunächst das Lithium zu Lithiumcarbonat bindet, um es folgend aus der Schwarzmasse herauszulösen. Auf diese Weise sollen 95 Prozent des Lithiums als batteriegerechtes Material zurückgewonnen werden können. Die übrigen Metalle wie Kobalt, Nickel, Mangan oder Kupfer werden chemisch ausgelaugt und zu reinen chemischen Verbindungen aufgearbeitet. <sup>141</sup>	GreenBatt (2022), Vorstellung der GreenBatt-Projekte, EarLiMet



Projekt	Kurzerläuterungen zu den Inhalten	Quelle
Pyrometallurgische Verarbeitung ganzer Batteriezellen sowie feiner Fraktionen	Das Projekt hat das Ziel, einen stabilen Prozess mit den grundsätzlichen Schritten Pyrometallurgie - Schlackenaufbereitung -, Hydrometallurgie zur Rückgewinnung von Lithium aus manganhaltigen Schlacken sowie schlackenaffinen Wertstoffen und einer im Bausektor verarbeitbaren Restschlacke zu entwickeln. Gegenstand der Untersuchungen ist dabei exemplarisch die Zellgeneration 6-2-2-NMC. Es wird untersucht, unter welchen Bedingungen (schwankende Inputmischungen, Einfluss von bspw. Mangan, Vorbehandlung der Batteriezellen, Eigenschaften des Flotationsregimes etc.) der Prozess stabil und effizient abläuft. Abschließend soll eine ökonomische und ökologische Bewertung der etablierten Prozessroute erfolgen. <sup>142</sup>	GreenBatt (2022), Vorstellung der Green-Batt-Projekte, PyroLith
Messung und Identifikation von Elektrolytbestandteilen	Das Projekt entwickelt eine Methode zur Messung niedrig- sowie hochsiedender Bestandteile des Elektrolyten. Durch die Möglichkeit dieser Prozessüberwachung bzw. Datenerhebung können Erkenntnisse über deren Verbleib im Verfahrensprozess generiert werden. Die darauf aufbauende Prozessstrategie, die im Labor- und Pilotmaßstab umgesetzt werden soll, zielt auf die vollständige Rückgewinnung aller Bestandteile des Elektrolyten ab. Abschließend soll über die Ergebnisse der notwendige prozesstechnische Aufwand zur Abtrennung des Elektrolyten bestimmt werden. <sup>143</sup>	GreenBatt(2022), Vorstellung der Green-Batt-Projekte, LOWVOLMON
Entwicklung einer robusten Resyntheseroute von Aktivmaterialien für Lithium-Ionen-Batterien	Aufbauend auf Erkenntnissen anderer Projekte des Kompetenzclusters Recycling & Grüne Batterie wie bspw. EarLiMet, PyroLith oder LOWVOLMON soll ein Anforderungskatalog an Rezyklatrohstoffe erarbeitet werden. Dazu sollen die Verwertbarkeit von extrahierten Materialien in der Resynthese (bspw. Einfluss der Verunreinigungen in der Schwarzmasse auf den Neueinsatz in der Batterieproduktion) untersucht und entsprechende Anforderungen für die industrielle Nutzung abgeleitet werden. <sup>144</sup>	GreenBatt (2022), Vorstellung der Green-Batt-Projekte, EVanBatter
Entwicklung einer industriellen Aufbereitungstechnologie	Das Projekt beinhaltet die Entwicklung einer industriellen Aufbereitungstechnologie. Im Fokus der Forschung standen die Wiederverwendung und das Recycling der Kathoden- und Anodenmaterialien. Dazu wurden Prozesse zur Zerlegung und Aufarbeitung unter Vermeidung von Hochtemperaturverfahren untersucht. Ebenso wurden aufbereitete Kathoden- und Anodenmaterialien hinsichtlich ihrer Einsatzfähigkeit in klein- und großformatigen Testzellen erprobt und eine entsprechende elektrochemische Charakterisierung vorgenommen. Die Passfähigkeit des Verfahrens wurde in einer Demonstrationslinie überprüft. <sup>145</sup>	Batterieforum Deutschland (2021), Projektdatenbank, ReALBatt

<sup>137</sup> Vgl. Helmholtz-Zentrum Dresden - Rossendorf e. V. (2021).

<sup>138</sup> Vgl. Folayan, T.-O. et al. (2021), S. 1.

<sup>139</sup> Vgl. greenBatt (2021a).

<sup>140</sup> Vgl. Gao, H. et al. (2020), S. 1.

<sup>141</sup> Vgl. greenBatt (2021b).

<sup>142</sup> Vgl. greenBatt (2021g).

<sup>143</sup> Vgl. greenBatt (2021e).

<sup>144</sup> Vgl. greenBatt (2021c).

<sup>145</sup> Vgl. Batterieforum Deutschland (2018).

## 4 ELEKTRO- UND ELEKTRONIK-ALTGERÄTE

### 4.1 Herausforderungen im Recycling von Elektro- und Elektronik-Altgeräten

Im Jahr 2020 wurden in Deutschland rund 2,8 Millionen Tonnen Elektro- und Elektronikgeräte (EAG) in Umlauf gebracht. In Abhängigkeit von der Gerätelebensdauer sowie dem ungeklärten Verbleib der Altgeräte außerhalb der offiziellen Entsorgungsstruktur wurden in den letzten Jahren knapp 45 Prozent der EAG jährlich gesammelt und einer Verwertung zugeführt. Insbesondere für einige der enthaltenen Sonder- und Edelmetalle – allen voran die Seltenen Erden – erfolgt aktuell jedoch keine umfassende Rückgewinnung. Dies führt zum Verlust wertvoller, limitierter Ressourcen.

#### 4.1.1 Aktuelle Recyclingsituation

Das Elektro- und Elektronikaltgerätegesetz (ElektroG) schreibt fest, dass seit 2019 die gesammelte Menge an Altgeräten 65 Prozent des Durchschnitts der in den drei vorangegangenen Jahren in Verkehr gebrachten Mengen an Elektro- und Elektronikgeräten betragen muss. Im Jahr 2020 machte **die Sammelquote 44,1 Prozent** aus und verfehlte damit die gesetzlich vorgeschriebene Sammelquote deutlich (ca. 20 Prozentpunkte bzw. 490.000 Tonnen; vgl. Tabelle 10).<sup>146</sup>

**Tabelle 10: Aufkommen von Elektro- und Elektronikgeräten sowie gesammelte EAG**

	2017	2018	2019	2020
In Verkehr gebrachte Mengen	2.081.223 t	2.375.643 t	2.590.244 t	2.847.926 t
Gesammelte Mengen	836.907 t	853.124 t	947.067 t	1.037.019 t
Sammelquote	45,1 %	43,1 %	44,3 %	44,1 %
Fehlende Mengen zur Sammelquote von 65 %	-	-	442.818 t	489.855 t

Die gesammelten Elektro-Altgeräte sind einer Verwertung zuzuführen, die eine Vorbereitung zur Wiederverwendung, ein stoffliches Recycling oder eine energetische Verwertung umfasst. Hierzu werden – bezogen auf die sechs festgelegten Gerätekategorien – Verwertungsquoten durch das ElektroG definiert.

<sup>146</sup> Vgl. Umweltbundesamt (2022c).

Für die Vorbereitung zur Wiederverwendung (VzWV) und das Recycling sind je nach Gerätekategorie 55 bis 80 Prozent der gesammelten EAG wiederzuverwenden oder zu recyceln. Diese Quoten wurden allesamt eingehalten (vgl. Tabelle 11).

**Tabelle 11: Verwertungsquote VzWV und Recycling<sup>147</sup>**

Nr.	Gerätekategorie	Vorbereitung zur Wiederverwendung	Recycling	Quote VzWv + Rec
1	Wärmeübertrager	255 t	162.383 t	85,4 %
2	Bildschirme > 100 cm <sup>2</sup>	1.866 t	100.759 t	90,5 %
3	Lampen	Keine Angabe	6.939 t	93,1 %
4a	Großgeräte, ausgenommen PV-Module	6.475 t	258.076 t	88,9 %
4b	PV-Module (Kapitel 5)	Keine Angabe	14.155 t	91,9 %
5	Kleingeräte (Äußere Abmessung < 50 cm)	6.955 t	232.333 t	82,5 %
6	Kleine IT- und Kommunikationsgeräte (Äußere Abmessung < 50 cm)	1.655 t	107.436 t	89,2 %

#### 4.1.2 Gesetzliche Herausforderungen

Das Elektro- und Elektronikaltgerätegesetz (ElektroG)<sup>148</sup> regelt die Rücknahme sowie die ordnungsgemäße Entsorgung von Elektro- und Elektronik-Altgeräten und setzt die Europäischen Vorgaben der WEEE-Richtlinie<sup>149</sup> (Directive 2012/19/EU on waste electrical and electronic equipment (WEEE)) in nationales Recht um. Aktuell erfolgt durch die Europäische Kommission eine Sondierung zu einer geplanten **Überarbeitung der europäischen WEEE-Richtlinie**. Europäische Agierende der Wertschöpfungskette konnten bis zum 3. November 2022 Rückmeldungen zur geplanten Evaluierung der Richtlinie geben. Durch die Europäische Kommission sollen im Rahmen dieser geplanten Evaluierung folgende Aspekte näher beleuchtet werden, die bei der Umsetzung der WEEE-Richtlinie in nationales Recht für die Mitgliedsstaaten bzw. die Agierenden der Wertschöpfungskette **Herausforderungen** darstellten:

<sup>147</sup> Vgl. Umweltbundesamt (2022c).

<sup>148</sup> Vgl. Bundesrepublik Deutschland (2015).

<sup>149</sup> Vgl. 2012/19/EU:2012-07.

- **Erreichung der Zielvorgaben** für die Sammlung von Elektro- und Elektronik-Altgeräten
- Gewährleistung der **ordnungsgemäßen Behandlung** von Elektro- und Elektronik-Altgeräten und die damit verbundenen gleichen Wettbewerbsbedingungen
- Anwendung der Anforderungen an die **erweiterte Herstellverantwortung** (insbesondere bei Online-Verkäufen)
- Bekämpfung **illegaler Tätigkeiten** und nicht dem Standard entsprechenden Praktiken im gesamten Prozess der Bewirtschaftung von Elektro- und Elektronik-Altgeräten

So sprach sich der Recycling-Dachverband EuRIC neben weiteren Forderungen für eine **Harmonisierung** der Regeln für alle Agierenden der europäischen Wertschöpfungskette aus. Aktuell werden die europäischen Vorgaben in die nationalen Rechtsvorschriften übernommen. Die fehlende Harmonisierung zwischen den EU-Staaten trägt u. a. dazu bei, dass weniger als 40 Prozent der Elektro- und Elektronik-Altgeräte in Europa recycelt werden.<sup>150</sup> Auch weitere Agierende sprechen sich in diesem Zusammenhang für den Transfer der Richtlinie in eine Verordnung aus, sodass diese unmittelbar in Kraft tritt, rechtlich verbindlicher ist und eine harmonisierte Gesetzgebung in der gesamten Europäischen Union gewährleistet.<sup>151</sup> Eine fehlende Harmonisierung bemängelt ebenso der VERE e. V., der beispielsweise eine Vergleichbarkeit europäischer Sammelquoten kritisch betrachtet, da jeweils andere Berechnungsverfahren und unterschiedliche Daten zu Grunde liegen.<sup>152</sup> Der Verein spricht sich ebenso für eine **produktgruppenspezifische Nachhaltigkeitsstrategie** resp. eine Differenzierung von Elektro-Altgeräten nach dem jeweiligen Rohstoffpotenzial aus. Dies würde, so argumentiert der VERE e. V., den Zielen des europäischen Green Deals entsprechen. Auch sei es sinnvoll, die definierten Ökodesign-Kriterien gezielter einzusetzen, um einen grundlegenden Wandel im Umgang mit Elektrogeräten zu erreichen. Die

---

<sup>150</sup> Vgl. EuRIC (2022).

<sup>151</sup> Vgl. Deutsche Umwelthilfe (2022).

<sup>152</sup> Vgl. VERE e.V. (2022).

WEEE-Gesetzgebung sollte **verbindliche Produkt- und Informationsanforderungen** für Langlebigkeit, Reparierbarkeit, Wiederverwendbarkeit, Recyclingfähigkeit, Recyclinganteil und Verringerung der Umweltauswirkungen während der Produktion, Nutzung und Entsorgung festlegen. Dies würde sich, so die Deutsche Umwelthilfe, positiv auf die Lebensdauer von elektrischen und elektronischen Produkten auswirken, die als Schlüsselement die Umweltauswirkungen von Ressourcenverbrauch und Entsorgung durch eine Verlängerung abschwächt.<sup>153</sup> Zudem wird vorgeschlagen, für Elektro- und Elektronikgeräte einen **digitalen Produktpass** einzuführen, der detaillierte Produktinformationen über verbaute Rohstoffe sowie ökologische und soziale Auswirkungen des Produkts für Nutzende und Abfallwirtschaft bereithält. Diese und weitere Rückmeldungen, Anmerkungen und Hinweise werden aktuell gesammelt und ausgewertet. Die Annahme durch die Europäische Kommission wird voraussichtlich noch 2023 erfolgen.

#### 4.1.3 Herausforderungen in der Praxis

Seit Inkrafttreten der ersten Fassung des ElektroG im Jahr 2005 wurden sukzessive Anpassungen an die Erfassung und Behandlung der Altgeräte vorgenommen. So wurden beispielsweise in der letzten Überarbeitung auch elektronische Marktplätze und Fullfilment-Dienstleistende verpflichtet, die ordnungsgemäße Registrierung von Herstellenden ohne Sitz in Deutschland zu kontrollieren. Auf diese Weise kann sichergestellt werden, dass sie die gesetzlich vorgeschriebene Produktverantwortung von ihren in Deutschland in Verkehr gebrachten Geräten übernehmen. Dennoch werden trotz aller Anstrengungen die Vorgaben der Sammelquote von 65 Prozent deutlich verfehlt.

#### Erfassung von Elektro-Altgeräten

Die Erfassung und Sammlung von Elektro-Altgeräten ist deutschlandweit umfassend umgesetzt. Dennoch führt das hinreichend bekannte Problem fehlender Sammelmengen und damit letztlich fehlender Sekundärrohstoffe seit Jahren zu umfassenden Diskussionen. Verschiedene Untersuchungen

---

<sup>153</sup> Vgl. Deutsche Umwelthilfe (2022).

zeigen neben weiteren Ursachen (vgl. Kapitel 5.1.2) folgende Gründe dafür auf:

### (a) Lagerung von Altgeräten in Haushalten

Deutsche Haushalte sind eine **Senke für Elektro-Altgeräte**. So wurden und werden nach wie vor ressourcenrelevante Altgeräte wie Laptops und Handys zunehmend in Haushalten aufbewahrt. Entsprechend einer Umfrage aus dem Jahr 2018 befanden sich rund **32 Millionen** alte, nicht benutzte Notebooks und Computer in deutschen Haushalten. Die eingelagerte Menge ungenutzter Laptops und PCs hat sich somit um rund zehn Millionen Stück im Vergleich zu 2014 mit einer Lagermenge von 22 Millionen Stück erhöht.<sup>154</sup> Auch bei Handys zeigt sich eine ähnliche Entwicklung. So lagerten in deutschen Haushalten im Jahr 2021 rund **206 Millionen alte Handys**. Das sind rund 100 Millionen Handys zusätzlich im Vergleich zu einer Umfrage aus dem Jahr 2015.<sup>155</sup> Im Durchschnitt enthält dabei eine Tonne Handys rund 250 Gramm Gold.<sup>156</sup> Bei einem angenommenen Durchschnittsgewicht von 170 Gramm pro Handy entspricht das einer Gesamt-Lagerungsmenge von rund neun Tonnen Gold. Zum Vergleich: In einer Tonne Golderz sind circa fünf Gramm Gold enthalten. Dies entspricht rund 1,8 Millionen Tonnen abgebauten Golderzes und verdeutlicht die Ressourcenrelevanz eingelagerter Elektro-Altgeräte.

### (b) Entsorgung von Elektro-Altgeräten über den Hausmüll

Der jährliche Anteil an Elektro-Altgeräten (hierzu zählen u. a. Kleingeräte wie Toaster, Drucker, elektrische und elektronische Spielzeuge etc.), der über den **Hausmüll entsorgt** wird, beträgt Schätzungen zufolge etwa 86.000 Tonnen.<sup>157</sup> Diese sogenannten Fehlwürfe sind trotz Hinweisen zur Getrennthaltungspflicht durch die Nutzenden auf den Elektro- und Elektronikgeräten jedoch bisher nicht vermeidbar.

---

<sup>154</sup> Vgl. bvse (2019).

<sup>155</sup> Vgl. Bitkom e.V. (2021).

<sup>156</sup> Vgl. Umweltbundesamt (2022d).

<sup>157</sup> Vgl. Umweltbundesamt (2022a).

### (c) Illegale Verbringungen von Elektro-Altgeräten

Im Rahmen einer Untersuchung abgeschätzt, dass im Jahr 2008 in etwa **155.000 Tonnen an Elektro-Altgeräten** über den Hamburger Hafen nach Übersee überführt werden.<sup>158</sup> Der Großteil dieser Geräte wird dabei unsachgemäß entsorgt, zumeist mittels Verbrennung auf Deponien, um die Wertstoffe zu erschließen. Daneben werden EAG auch über die osteuropäische Grenze verbracht. In Hochrechnungen wird die Menge auf ungefähr 77.000 Tonnen pro Jahr geschätzt.<sup>159</sup> Auf illegale Verbringungen wurde zwischenzeitlich von gesetzlicher Seite her reagiert. So dürfen nun ausschließlich überprüfte und funktionsfähige Gebrauchtgeräte, die durch eine adäquate Verpackung vor Beschädigungen geschützt sind, als „Nicht-Abfall“ exportiert werden. Darüber hinaus wurde sich auf eine umgekehrte Beweislast geeinigt. Das bedeutet, Transportunternehmen, die deklarierte Gebrauchtwaren befördern, müssen nachweisen, dass die funktionstüchtigen Geräte für eine erneute Nutzung vorgesehen sind. Zuvor lag die Beweislast auf Seiten der Behörden, die einen entsprechenden Verstoß gegen das Abfallverbringungsgesetz (AbfVerbrG) nachzuweisen hatten.<sup>160</sup> Aktuelle Untersuchungen zu dennoch erfolgenden illegalen Verbringungen existieren nicht.

### (d) Berechnung der Sammelquoten

Neben logistischen Gründen kann eine weitere Ursache für die Lücke zwischen der in Verkehr gebrachten und gesammelten Menge in der zugrundeliegenden Berechnungsmethodik identifiziert werden. Die Lebensdauer von Elektro(nik)geräten reicht von mehreren Monaten bis zu mehreren Jahren oder gar Jahrzehnten. Mit Blick auf die stetige Zunahme an in Verkehr gebrachten Geräten, die schneller wächst als die zur Sammlung verfügbaren EAG, **verzerrt die Berechnungsmethodik** die resultierenden Sammelquoten. Es sprechen sich aus diesem Grund einzelne Agierende für eine Sammelquote pro Kopf (Person) und Jahr aus.<sup>161, 162</sup>

---

<sup>158</sup> Vgl. Sander, K. und Schilling, S. (2010), S. 57.

<sup>159</sup> Vgl. Janz, A. et al. (2009), S. 17f.

<sup>160</sup> Vgl. BMUV (2022a).

<sup>161</sup> Vgl. European Recycling Platform (2022), S. 1.

<sup>162</sup> Vgl. EWRN (2022), S. 5.

### Vorbereitung zur Wiederverwendung

Im Koalitionsvertrag 2021 – 2025 der Bundesregierung wurde festgelegt, dass ein **Recht auf Reparatur** umgesetzt werden soll. Als Ansatzpunkte und Grundlage für die Umsetzung dessen werden zum einen das ökologische Produktdesign genannt, zum anderen das Warenkaufrecht sowie finanzielle Förderungen.<sup>163</sup> Dieser Ansatz ist jedoch nur dann umsetzbar, wenn die notwendigen Bedingungen durch Herstellende und Inverkehrbringende hinsichtlich Reparierbarkeit, Verfügbarkeit von Ersatzteilen und Reparaturinformationen erfüllt werden. In diesem Zusammenhang veröffentlichte der Runde Tisch ‚Reparatur‘ dreizehn Empfehlungen, die unter anderem EU-weite und produktgruppenübergreifende Reparaturanforderungen, finanzielle Förderung der Gewinnung gebrauchter Ersatzteile oder eine Bereitstellung von Software-Updates über eine Dauer von zehn Jahren beinhalten.<sup>164</sup> Eine Studie des Umweltbundesamtes untersuchte und präsentierte in diesem Zusammenhang Faktoren, die eine Reparatur von Elektro- und Elektronikgeräten begünstigen und letztlich als Anforderungen an Herstellende festgelegt und über entsprechende Kennzeichnungen an die Kundschaft kommuniziert werden können.<sup>165</sup>

### Gewinnung von Edel- und Sondermetallen

Durch die Vermischung mit weniger ressourcenrelevanten Stoffströmen wie Druckern, Kopierern usw. können zahlreiche Edel- und Sondermetalle aus den resultierenden Sortierfraktionen nicht mehr zurückgewonnen werden. Eine Optimierung der Schredder und Sortiertechnologien ist zwar möglich und sinnvoll, dennoch sollte vor dem Schreddern für eine noch effizientere Rohstoffrückgewinnung eine **manuelle Demontage von Bauteilen** wie beispielsweise Leiterplatten erfolgen. So optimiert eine Aufkonzentrierung der besonders werthaltigen Stoffströme (Edel- und Sondermetalle) die Ausbeute im Rückgewinnungsprozess, insbesondere bei ressourcenrelevanten Elektrogeräten, die oftmals über eine dissipative Verteilung der Rohstoffe im Gerät charakterisiert, also in kleinen Mengen über das gesamte Produkt verteilt, sind. Aufgrund der aktuellen Marktlage wird dieser Arbeitsschritt

---

<sup>163</sup> Vgl. BMUV (2022b).

<sup>164</sup> Vgl. Meyer, K. (2022).

<sup>165</sup> Vgl. Ritthoff, M. et al.(2022), S. 15.



teilweise bereits so umgesetzt, allerdings können auch hier weitere Optimierungspotenziale ausgemacht werden.<sup>166</sup> In diesem Zusammenhang wurden über das Umweltbundesamt Studien in Auftrag gegeben, deren Ergebnisse in der Altgeräte-Behandlungsverordnung Anwendung finden.

Eine Optimierung der Rückgewinnung von Sonder- und Edelmetallen wurde durch eine aktuelle Studie unterstrichen. So wurde die durchschnittliche Lebensdauer von 61 Metallen über eine Lebenszyklusanalyse untersucht. Es zeigte sich, dass bei 15 der untersuchten Metalle (hierzu zählen Gallium, Scandium oder Germanium) die **Produktionsverluste**, bei drei Metallen (Barium, Quecksilber, Strontium) die **Nutzungsverluste** und im Falle der restlichen 43 Metalle die **Verluste im Zuge der Abfallbewirtschaftung bzw. beim Recycling** am größten sind; hierrunter fallen Metalle wie Aluminium, Zink, Silizium, Silber und Gold u. v. m.<sup>167</sup>

Eine weitere Studie untersuchte den **Stand der Rückgewinnungsverfahren** von Metallen aus Post-Consumer-Altprodukten. Dabei zeigte sich u. a., dass sich insbesondere Technologien für Seltene Erden noch im Pilotanlagenstatus oder im Labormaßstab befinden (vgl. Tabelle 12).

**Tabelle 12: Stand der Rückgewinnungstechnologien für Metalle aus Post-Consumer-Altprodukten<sup>168</sup>**

Rückgewinnungs-ketten im Industriemaßstab	Rückgewinnungs-ketten in Pilotanlagen	Rückgewinnungs-ketten im Labormaßstab
Silber, Gold, Kobalt, Iridium, Lithium, Osmium, Palladium, Platin, Rhodium, Ruthenium, Antimon, Zinn, Tellur	Indium, Cer, Lanthan, Neodym, Praseodym, (Cer und Lanthan aus NiMH-Batterien)	Cer, Dysprosium, Gallium, Terbium, Beryllium, Germanium, Niob, Rhenium, Tantal, Wolfram, (Cer, Terbium aus Leuchtstoffen)

Aus diesem Grund sollte die Verbesserung der Kreislaufwirtschaft für die meisten Metalle vor allem im Bereich der Entwicklung recyclingfähiger Produkte mit längerer Lebensdauer ansetzen sowie in einer optimierten

<sup>166</sup> Vgl. Umweltbundesamt (2022d).

<sup>167</sup> Vgl. Charpentier Poncelet, A. et al. (2022), S. 722.

<sup>168</sup> Vgl. Sander, K. et al. (2018), S. 92.

Rückgewinnung aus veralteten Anwendungen mithilfe von verbesserten Sammel- und Recyclingsystemen.<sup>169</sup>

### Dialogplattform Recyclingrohstoffe<sup>170</sup>

Im Rahmen der Rohstoffstrategie der Bundesregierung aus dem Jahr 2020 wurde über einen Dialogprozess zwischen Industrie, Wissenschaft und Verwaltung beschlossen, mithilfe des Beitrags von Sekundärrohstoffen die Versorgungssicherheit sukzessive zu stärken. Dazu sollen mit den teilnehmenden Agierenden in zwei Arbeitskreisen (AK Metalle und AK Industrieminerale) Barrieren und Schwachstellen in der Sekundärrohstoffversorgung erkannt und - darauf aufbauend - stoffstromspezifische Zielparame- ter festgelegt sowie mögliche Zielkonflikte identifiziert werden. Im Ergebnis werden Handlungsoptionen abgeleitet, über die sowohl neue Recyclingpotenziale der einzelnen Stoffströme als auch des Gesamtsystems erschließbar sind. Die Ergebnisse der Arbeiten der Dialogplattform Recyclingrohstoffe werden für Herbst 2023 erwartet.

## 4.2 Stand der Technik

Im Anschluss an die Sammlung und Erfassung der Elektro-Altgeräte müssen sie gemäß § 3 Nummer 24 ElektroG vor der Verwertung einer Erstbehandlung unterzogen werden. Die Altgeräte werden hierbei entweder für eine Vorbereitung zur Wiederverwendung separiert oder von Schadstoffen entfrachtet, um anschließend Wertstoffe aus den Altgeräten zu entfernen (in diesem Zusammenhang ist insbesondere auf eine vollständige Entnahme von Batterien und Akkumulatoren zu achten, vgl. Kapitel 3 der vorliegenden Kurzanalyse).<sup>171</sup> Die anschließende mechanische Aufbereitung für Elektro-Altgeräte kann schematisch in die drei Grundschritte **Konditionierung**, **Klassierung** und **Sortierung** gegliedert werden (vgl. Abbildung 8), bevor eine metallurgische Endverarbeitung vorgenommen wird. Die Schritte von der Sammlung über die mechanische Behandlung bis zur Edelmetallrückge-

<sup>169</sup> Vgl. Charpentier Poncelet, A. et al. (2022), S. 717.

<sup>170</sup> Vgl. Dialogplattform Recyclingrohstoffe (2022).

<sup>171</sup> Vgl. Hofmann, A. (2017), S. 70.

winnung greifen dabei ineinander und werden von verschiedenen Agieren den durchgeführt. Eine hohe Effizienz eines jeden Prozessschrittes ist essenziell, um hohe Rückgewinnungsraten zu erreichen und ein effizientes Gesamtsystem zu generieren.<sup>172</sup>

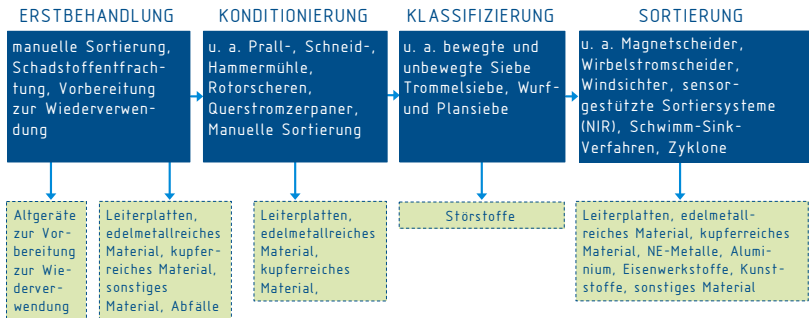


Abbildung 8: Schematische mechanische Behandlung von Elektro-Altgeräten (eigene Darstellung)<sup>173</sup>

Die **mechanische Aufbereitung** von Elektro-Altgeräten unterscheidet sich in Abhängigkeit von der jeweiligen Gerätekategorie (vgl. Tabelle 11). So werden an das Recycling von Wärmeüberträgern bzw. Kältespeichern (Gerätekategorie 1) andere Anforderungen (Fokus Schadstoffentfrachtung) gestellt als beispielsweise an Kleingeräte oder IT-Kommunikationsgeräte. Anforderungen an die Behandlung von Elektro-Altgeräten werden neben der EAG-Behandlungsverordnung durch die LAGA-Mitteilung 31b „Technische Anforderungen an die Behandlung und Verwertung von Elektro- und Elektronikaltgeräten“ festgeschrieben.<sup>174</sup>

Im Folgenden soll sich auf die mechanische Aufbereitung von **ressourcenrelevanten Elektro-Altgeräten** fokussiert werden, hier im Besonderen die Gerätekategorien 6 (kleine IT- und Kommunikationsgeräte) und 4a (Großgeräte ohne PV-Module). In diesen beiden Kategorien spielen die verbauten Leiterplatten eine wesentliche Rolle. Je nach Geräteart kann hier die Metall-

<sup>172</sup> Vgl. Hagelüken, C. (2022), S. 14.

<sup>173</sup> Vgl. Martens, H. und Goldmann, D. (2016), S. 459.

<sup>174</sup> Vgl. Hofmann, A. (2018).

konzentration in den Leiterplatten zwischen 1 und 50.000 mg pro kg Leiterplatte variieren.<sup>175</sup> So sollen, gemäß der EAG-Behandlungsverordnung, bereits bei der Erstbehandlung Geräte mit besonders hohen Wertstoffgehalten in Leiterplatten (bezogen auf den Behandlungsweg) separiert werden. Dies betrifft beispielsweise Laptops, Handys, Server, Router usw.<sup>176</sup> Neben einer frühzeitigen Separation der Leiterplatten sollen zudem

- eine vollständige Lenkung weiterer edelmetallhaltiger Fraktionen in die Edelmetallrückgewinnung,
- eine Verwertung der Leiterplatten- und edelmetallhaltigen Fraktionen nach dem aktuellen Stand der Technik und
- eine Separation sondermetallhaltiger Bauteile und eine Zuführung derer zur Metallrückgewinnung gewährleistet werden (vgl. Abbildung 9).<sup>177</sup>

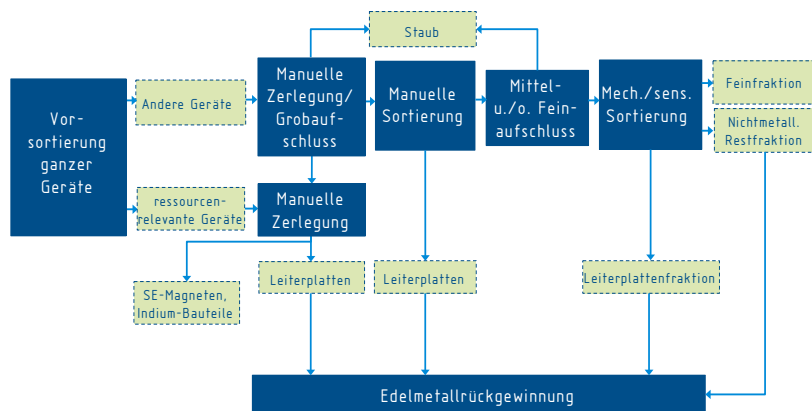


Abbildung 9: Rückgewinnung von Leiterplatten (eigene Darstellung)<sup>178</sup>

<sup>175</sup> Vgl. Sander, K. et al. (2018), S. 82.

<sup>176</sup> Vgl. Kummer, S. et al. (2020), S. 32.

<sup>177</sup> Vgl. Kummer, S. et al. (2020), S. 32.

<sup>178</sup> Vgl. Kummer, S. et al. (2020), S. 32.

Die sich anschließende Edelmetallrückgewinnung erfolgt durch eine Kombination aus **mechanischen, pyro- und hydrometallurgischen Prozessen**. Dabei werden drei Haupttrouten unterschieden: die Route für Eisen/Stahl, die Aluminium-Route und die Route für Kupfer/Edelmetall/einige Sondermetalle. Zusätzlich existieren spezialisierte metallurgische Prozesse für Seltene Erden aus Magneten oder Indium aus LCD-Bildschirmen.<sup>179</sup> Unternehmen wie beispielsweise Aurubis oder Umicore betreiben spezielle Prozesse, die eine effiziente Rückgewinnung der Massemetalle wie Kupfer, aber auch der Edel- und Sondermetalle wie Gold leisten.<sup>180, 181</sup> Wesentlich ist dabei, dass bei der mechanischen Aufbereitung eine Verschleppung von insbesondere Edel- und Sondermetallen in andere Stoffströme wie Kunststoffe, Eisen/Stahl oder Aluminium vermieden wird, da eine Rückgewinnung in diesem Fall nicht mehr möglich wäre. Tieferegehende Informationen zu den im industriellen Maßstab angewandten Recyclingtechnologien können der gängigen Literatur entnommen werden.

### 4.3 Innovative Recyclingtechnologien

Der Fokus aktueller Projekte im Bereich des Elektrogeräterecyclings liegt auf der effizienten und effektiven Demontage sowie Abtrennung der wesentlichen ressourcenrelevanten Bauteile innerhalb der mechanischen Aufbereitung – hierbei handelt es sich um eine sogenannte **inverse Produktion**. Die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten antworten somit auf die Forderungen, eine Verschleppung von Stoffströmen zu vermeiden.

So wurde im Projekt „ADIR – Next generation urban mining – Automated disassembly, separation and recovery of valuable materials from electronic equipment“ eine automatisierten Demontageanlage für Mobiltelefone und Platinen entwickelt, die mithilfe von Lasertechnik, Robotik, Visionssystemen und Informationstechnologien eine effiziente Herauslösung von Wertstoffen realisiert. Der Fokus wurde dabei vor allem auf die Elemente Tantal, Neodym, Wolfram, Kobalt und Gallium gelegt. So konnte beispielsweise Tantal zu 96 – 98 Prozent zurückgewonnen werden. In dem vorwettbewerblichen Projekt wurden über 1.000 Handys und mehr als 800 große

---

<sup>179</sup> Vgl. Hagelüken, C. (2022), S.15.

<sup>180</sup> Aurubis AG (2022).

<sup>181</sup> Umicore Precious Metals Refining (2022).

Computerplatinen zerlegt und die Prozessdaten in einer Datenbank gesammelt, um sie für künftig geplante Optimierungen, etwa bei der Prozessbeschleunigung und -automatisierung, zu nutzen. Zudem sollen u. a. Mitarbeitende befähigt werden, die Recyclinganlage auf neue Mobiltelefonmodelle anzulernen. Laut Autorinnen und Autoren wurde ein großes Interesse aus der Wirtschaft wahrgenommen, da über den Prozess die Wertstoffe in effizienter Weise entnommen werden können und gleichzeitig eine wirtschaftliche Machbarkeit gegeben ist.

Das ähnlich angelegte Projekt **IRETA** entwickelte drei aufeinander aufbauende Verfahren, um Tantal aus dem Elektroschrott zurückzugewinnen:

- (1) Erkennung und Laserentfernung von Tantalkondensatoren
- (2) Mechanische Behandlung zur Gewinnung von Tantalanoden
- (3) Verfahren zur Reinigung der Anoden für Gewinnung von reinem Tantal

Es konnte gezeigt werden, dass über die Verfahrenskette Tantal mit einem Reinheitsgrad von 98 Prozent wiedergewonnen werden konnte. Da für den Verkauf von reinem Tantal Reinheiten von 99,5 Prozent erforderlich sind, soll mithilfe weiterer Forschung das Verfahren zunehmend optimiert werden, wobei die Autorinnen und Autoren dies als machbar einschätzen. Zudem können für alle drei Verfahren – verglichen mit der Nutzung von Primärtantal – ökologische Vorteile in sämtlichen Umweltkategorien erzielt werden. Allerdings erweisen sich die entwickelten Verfahren aktuell noch als nicht wirtschaftlich. Dieser Umstand liegt in der Farbigkeit der Tantalkondensatoren begründet. Während beispielsweise gelbe Kondensatoren leicht separierbar sind, wurde für schwarze Tantalkondensatoren, die etwa die Hälfte der Kondensatoren ausmachen, eine geringere Erkennungsrate erzielt. Im Anschlussprojekt **IRETA 2** erfolgen die ökologische und ökonomische Optimierung und die Überführung der Ergebnisse in ein Anlagenkonzept.<sup>182</sup>

Das Projekt **iRVE** zielte auf die Entwicklung von Verfahren zur effektiven Rückgewinnung von Wertstoffen aus großen Mengen von Elektroschrott ab.

---

<sup>182</sup> Vgl. Sauer et al. (2019), S. 219ff.

Es sollte festgestellt werden, welches Verfahren – die selektive Entstückung oder die Entstückung mittels selektiver Zerkleinerung und Sortierung – effizientere Trennergebnisse liefert. Die selektive Entstückung sieht dabei die Erkennung von Merkmalen wie Größe und Farbe von Leiterplatten durch Sensoriksysteme sowie die entsprechend gezielte Identifikation und Entstückung der Bauteile vor. Die Entstückung mittels selektiver Zerkleinerung und Sortierung umfasst eine elektrohydraulische Zerkleinerung über die Bauteile der Leiterplatte getrennt und sortiert sie anschließend automatisch. Mithilfe dieser Ergebnisse sollen Unternehmen befähigt werden, insbesondere im Bereich Erkennung, Sortierung und Trennung von Materialien, existierende Anlagen zu optimieren oder neue Anlagen zu konzipieren<sup>183, 184</sup>

Das irische Unternehmen Votechnik entwickelte für die effiziente Demontage von LCD-Bildschirmen die automatisierte **Recyclinganlage ALR-400**. Zentrales Element der Anlage ist der Industrieroboter KR Quantec der Firma Kuka. Der Industrieroboter selbst zeichnet sich durch eine hohe Betriebseffizienz und einen modularen Aufbau aus, wodurch einerseits die Wartungsarbeiten minimiert werden und eine Recyclingfähigkeit des Roboters zu 90 Prozent gegeben ist. Die Recyclinganlage ALR-400 wiederum ermöglicht eine automatisierte Demontage der LCD-Bildschirme. So können einerseits Gase wie Quecksilber und scharfkantige Bauteile ohne Gefährdung von Mitarbeitenden entnommen und andererseits eine effiziente Zerlegung der LCD-Bildschirme in die relevanten Stoffströme vorgenommen werden. Aufgrund der Automatisierung erfolgt die Demontage zudem schneller: Während mittels händischer Sortierung ungefähr fünf Geräte pro Stunde demontiert werden können, ermöglicht die automatisierte Sortierung die Demontage von circa 60 Geräten pro Stunde.<sup>185</sup>

Ein neues Konzept, das sich aktuell noch in der frühen Forschungs- und Entwicklungsphase befindet, ist das sogenannte **Biodismantling**. Ein Forschungsprojekt untersuchte die effiziente Trennung der Bauteile von den Leiterplatten durch Einlegen der Platten in ein Bad aus Eisenlösung. Dieser

---

<sup>183</sup> Vgl. Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz (2022).

<sup>184</sup> Vgl. Technische Hochschule Aschaffenburg (2022).

<sup>185</sup> Vgl. KUKA Deutschland GmbH (2022).

Lösung wird zu Beginn eine Mischkultur aus verschiedenen Bakterien, insbesondere *Acidithiobacillus Ferrooxidans*, zugeführt. Dadurch kommt es zur Oxidation von Eisen II zu Eisen III, da die zugesetzten Bakterien das Eisen II als Energiequelle nutzen. Die vollständige Oxidation ist nach circa zwei Tagen abgeschlossen. Anschließend werden die Leiterplatten in die Lösung gegeben. Das Eisen III wirkt als starkes Oxidationsmittel, bringt das Lötzinn in Lösung und wird im Zuge dessen wieder zu Eisen II reduziert. So fallen nach etwa 20 Tagen die Bauteile von der Leiterplatte ab und können gezielt recycelt werden. Die Biolaugung befindet sich aktuell noch im Forschungsstadium und zeigt lange Verweilzeiten, wird allerdings als ressourcen- und energieschonendes Verfahren zur gezielten Stoffstromerzeugung eingeschätzt.<sup>186</sup>

---

<sup>186</sup> Vgl. Monneron-Enaud, B. und Kramer, J. (2021), S. 1.



## 5 PHOTOVOLTAIK-MODULE

### 5.1 Herausforderungen im Recycling von PV-Modulen

Photovoltaik-Module erlebten seit den 1990er Jahren einen steten Aufschwung. Mit Inkrafttreten des Erneuerbare-Energien-Gesetzes im Jahr 2000 erhöhte sich die Umlaufmenge nochmals sprunghaft. Im Jahr 2020 waren knapp zwei Millionen Photovoltaikanlagen mit einer Leistung von 54 Gigawatt verbaut. Das entspricht einer Stromerzeugung von ca. 51,4 Terawattstunden.<sup>187</sup> Bis zum Jahr 2040 wird geschätzt, dass sich die verbaute Leistung mehr als verdreifachen wird.<sup>188</sup> Die Lebensdauer der Module beträgt ca. 25 Jahre. Aktuell sind die Rückläufe aus der Nutzungsphase noch überschaubar. Dennoch wird sich die Entsorgungs- und Recyclingbranche in Zukunft mit einem steigenden Wertstoffstrom der PV-Module auseinandersetzen müssen.

#### 5.1.1 Aktuelle Recyclingsituation

So müssen sich sowohl Herstellende als auch Handel, die Solar- bzw. PV-Module auf den deutschen Markt bringen, seit 2015 entsprechend dem Elektroaltgeräte-Gesetz (ElektroG) bei der Stiftung Elektro-Altgeräte Register (Stiftung EAR) registrieren. Mengenmeldungen sowie Entsorgungsnachweise usw. sind durch sie bzw. durch beauftragte Dritte entsprechend den Vorgaben der Stiftung EAR zu dokumentieren. Damit erfüllen Herstellung und Handel die im § 23 des Kreislaufwirtschaftsgesetz festgelegte **Produktverantwortung**.

Die gemeldeten Mengen werden seit 2016 erfasst. Die Daten umfassen dabei u. a. die **in Verkehr gebrachten Mengen** und die Mengen, die in einer Erstbehandlungsanlage entgegengenommen werden. Die in Verkehr gebrachten Mengen nahmen von 2017 bis 2019 um jährlich ca. 60.000 Tonnen zu und beliefen sich für das Jahr 2019 auf insgesamt **272.422 Tonnen** (vgl. Tabelle 13).

---

<sup>187</sup> Vgl. EU-Recycling Magazin (2022a).

<sup>188</sup> Vgl. Wirth, H. (2022), S. 6.

Tabelle 13: In Verkehr gebrachte Mengen an Photovoltaikmodulen<sup>189, 190, 191</sup>

Jahr	In Verkehr gebrachte Menge an PV-Modulen
2019	272.422 Tonnen
2018	211.142 Tonnen
2017	155.539 Tonnen

Auch die Mengen, die einer **Erstbehandlung** zugeführt wurden, zeigen einen deutlichen Zuwachs von 2.000 Tonnen im Jahr 2016 auf über **15.000 Tonnen** im Jahr 2020 (vgl. Tabelle 14). So nahm ebenso die Anzahl der Entsorgungsanlagen, die PV-Module annehmen, von 13 Anlagen im Jahr 2016 auf 27 Anlagen im Jahr 2020 zu.<sup>192</sup>

Die mehrheitlichen PV-Abfälle, die 2018 in die Entsorgung gelangten, wiesen dabei Schäden auf, die entweder bei der Produktion, beim Transport, bei der Installation, bei nichtfachgerechter Demontage oder durch Wettereinfluss (wie zum Beispiel Hagel) entstanden sind oder die – basierend auf Garantie- und Gewährleistungsfällen – ausgesondert wurden.<sup>193</sup> Künftig ist davon auszugehen, dass die **Mengen zur Verwertung steigen**, da die ersten verbauten Module aus den 1990er Jahren das technische Lebensende sukzessive erreichen werden. Bis zum Jahr 2020 stammten rund drei Viertel der entsorgten PV-Module aus der gewerblichen Nutzung. Hierbei handelt es sich beispielsweise um PV-Module, die auf Produktionsstätten und ähnlichen gewerblichen Institutionen installiert wurden.

Tabelle 14: Mengenentwicklung von PV-Modulen (2017 – 2020)<sup>194</sup>

Jahr	Menge gesamt	davon gewerbl. Altgeräte	VzWV*	Stoffl. Verwert.	Energ. Verwert.	Beseitigung
2020	15.400 t	11.000 t	k. A.	11.900 t	1.100 t	k. A.
2019	13.400 t	10.800 t	k. A.	11.500 t	1.200 t	k. A.
2018	7.900 t	5.600 t	900 t	6.000 t	800 t	200 t
2017	3.600 t	2.600 t	300 t	3.100 t	200 t	k. A.
2016	2.000 t	k. A.	400 t	1.300 t	200 t	100 t

\*Vorbereitung zur Wiederverwendung; k. A.: keine Angabe

<sup>189</sup> Vgl. Löhle, S.; Schmiedel, U. und Bartnik, S. (2019), S. 14.

<sup>190</sup> Vgl. Löhle, S.; Schmiedel, U. und Bartnik, S. (2020), S. 68.

<sup>191</sup> Vgl. Umweltbundesamt (2022c).

<sup>192</sup> Vgl. Statistisches Bundesamt (2022b).

<sup>193</sup> Vgl. Hofmann, A. (2018), S. 68.

<sup>194</sup> Vgl. Statistisches Bundesamt (2022b).

Es existieren drei Generationen von PV-Modulen, wobei **aktuell nur die erste und die zweite Generation** in der Entsorgungsbranche von Belang sind.

- 1. Generation: PV-Module mit Solarzellen aus kristallinem Silizium (c-Si)
- 2. Generation: PV-Module mit Dünnschichtzellen, zum Beispiel aus amorphem Silizium (a-Si), Cadmiumtellurid (CdTe) oder Zellen, die Kupfer, Indium, Selen oder teilweise Gallium enthalten (CIS, CIGS)
- 3. Generation: Weitere Technologien wie organische PV-Module<sup>195</sup>

Unter den aktuell verbauten PV-Modulen ist ein Anteil von rund 90 Prozent der ersten Generation zuzuordnen, während rund zehn Prozent auf die PV-Module mit Dünnschichtzellen (2. Generation) entfallen. Technologien der dritten Generation sind aktuell noch mehrheitlich in der Entwicklung und bezüglich Rücknahme und Recycling zu vernachlässigen.

### 5.1.2 Gesetzliche Herausforderungen

Mit der Aufnahme von PV-Modulen in den gesetzlichen Rahmen des ElektroG unterliegen die Module – gemeinsam mit den anderen Kategorien der Elektro-Altgeräte – einer zu **erbringenden Sammelquote von insgesamt 45 Prozent** bis zum Jahr 2018. Diese errechnet sich aus dem Verhältnis des gesammelten Gewichts an Elektro-Altgeräten zum gemittelten Gesamtgewicht der in den letzten drei Jahren in Umlauf gebrachten Elektro- und Elektronikgeräte.

Im Jahr 2018 betrug die erreichte Sammelquote für Elektro(nik)-Altgeräte 43,11 Prozent und verfehlte damit die gesetzliche Vorgabe von 45 Prozent knapp. Die lange Nutzungsdauer von PV-Modulen sowie die hohen auf den Markt gebrachten Mengen beeinflussen die Sammelquote dabei maßgeblich. Ohne die Beachtung der PV-Module wäre für 2018 eine Sammelquote von 44,69 Prozent erreichbar gewesen. Dieser Umstand erschwert das Erreichen der seit 2019 festgelegten **Sammelquote von 65 Prozent** noch zusätzlich.

---

<sup>195</sup> Vgl. Hofmann, A. (2017), S. 29.

Diese Sammelquote für 2019 verfehlte mit 44,3 Prozent die gesetzliche Vorgabe von 65 Prozent deutlich. So wurde eine angepasste und harmonisierte Berechnungsgrundlage der Sammelquoten im Rahmen der Sondierung zu einer geplanten Überarbeitung der europäischen WEEE-Richtlinie bereits durch Kommentare angesprochen.<sup>196</sup>

Die Diskrepanz zwischen in Verkehr gebrachten PV-Modulen und den gesammelten und einer Verwertung zugeführten PV-Modulen ist einerseits abhängig von der technischen Lebensdauer, andererseits vom wirtschaftlichen Betrieb der PV-Module. Letzterer ist wesentlich durch die im **Erneuerbare-Energien-Gesetz festgelegte Einspeisevergütung** beeinflusst. Besitzerinnen und Besitzern von Anlagen wird dabei eine Vergütung über einen Zeitraum von 20 Jahren garantiert. Diese lag für kleine Anlagen im Jahr 2000 noch bei 50 Cent pro Kilowattstunde. Seit 2022 beläuft sich diese auf noch 6,83 Cent pro Kilowattstunde – begründet durch die im Erneuerbare-Energien-Gesetz festgelegte Degression. Damit wird jedoch mit fortschreitender Senkung der Einspeisevergütung ein wirtschaftlicher Betrieb von PV-Anlagen in Frage gestellt und kann sich künftig auf die in Verkehr gebrachten Mengen auswirken.

### 5.1.3 Herausforderungen in der Praxis

Es ist davon auszugehen, dass die zu entsorgenden PV-Module in den kommenden Jahren zunehmen werden. Prognostiziert wird ein Abfallaufkommen an PV-Modulen im Jahr 2025 von rund 14.000 – 22.000 Tonnen, das in den folgenden Jahren kontinuierlich auf rund 4,9 bis 9,6 Millionen Tonnen im Jahr 2050 steigen wird (vgl. Tabelle 15). Andere Hochrechnungen nehmen derweil ein Mengenaufkommen von rund 37.000 Tonnen im Jahr 2022 und 87.000 Tonnen bis zum Jahr 2030 an.<sup>197</sup>

---

<sup>196</sup> Vgl. European Commission - Have your say (2023).

<sup>197</sup> Vgl. Kummer, S. et al. (2020), S. 116.

Tabelle 15: Prognose der PV-Modulmengen zur Entsorgung bis 2050<sup>198</sup>

Jahr	Prognostizierte Mengen
2025	14.000 - 22.000 Tonnen
2030	152.000 - 223.000 Tonnen
2035	1,8 - 2,9 Millionen Tonnen
2050	4,9 - 9,6 Millionen Tonnen

Die PV-Module bestehen zu einem **Großteil aus Glas, Kunststoff und Aluminium**. Materialien, die in geringeren Mengen verbaut wurden, sind u. a. Kupfer, Silikon oder andere Metalle wie Zink, Nickel, Selen, Blei und Cadmium. Insbesondere Cadmiumtellurid-Dünnschicht-Module weisen mit über 95 Prozent einen besonders hohen Glasanteil auf (vgl. Abbildung 10).<sup>199</sup>

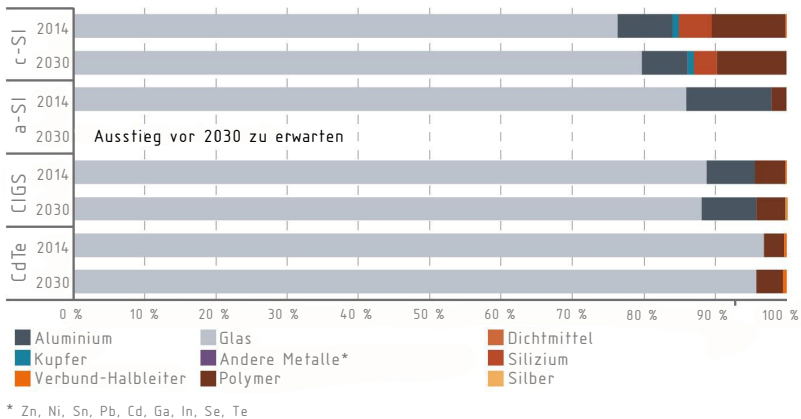


Abbildung 10: Zusammensetzung von PV-Modulen der verschiedenen Generationen<sup>200</sup>

Es wurde rückblickend ermittelt, dass das Glasabfallpotenzial für alle PV-Technologien im Jahr 2020 zwischen 8.000 und 51.500 Tonnen betrug. Für Aluminium belaufen sich die errechneten Abfallpotenziale für dasselbe Jahr auf circa 7.000 bis 41.000 Tonnen, wobei hier lediglich c-SI-Module betrachtet wurden.<sup>201</sup>

<sup>198</sup> Vgl. Kummer, S. et al. (2020), S. 116.

<sup>199</sup> Vgl. IRENA und IEA-PVPS (2016), S. 41.

<sup>200</sup> © IRENA und IEA-PVPS (2016), S. 41.

<sup>201</sup> Vgl. Kummer, S. et al. (2020), S. 128.

Das adäquate **Recycling von PV-Modulen** trägt wesentlich zur **Reduktion von Treibhausgasemissionen** bei. So spart das Recycling von einer Tonne PV-Modulen auf Siliziumbasis rund 800 bis 1.200 kg CO<sub>2</sub>äq durch den Wiedereinsatz der Rezyklate ein. Die Gutschriften werden hierbei hauptsächlich durch das Recycling der Glas- sowie der Aluminiumfraktion erreicht.<sup>202</sup>

Das **hochwertige Glas der PV-Module** wird nach der Verwertung für die Herstellung von Isolier-/Akustikdämmung, Glaswolle oder Schaumglas verwendet und somit **downgecycelt**.<sup>203</sup> Ein Einsatz in der Flach- und Behälterglasindustrie ist technisch jedoch grundsätzlich möglich. So konnten Metallpartikel, Folienanhaftungen usw. in der Glasfraktion bereits erfolgreich von siliziumbasierten PV-Modulen getrennt werden. Allerdings ist eine wirtschaftliche Umsetzung aufgrund der aktuell geringen Mengen zur Verwertung noch nicht realisierbar.<sup>204</sup>

Der Aluminiumrahmen der PV-Module wird standardmäßig entweder vor der Zerkleinerung demontiert oder nach dem Schredder-Prozess zurückgewonnen. Die Weitergabe in ein hochwertiges werkstoffliches **Aluminiumrecycling** ist etabliert und generiert die **höchsten Erlöse** aus dem PV-Recycling.

Weitere Bestandteile von PV-Modulen sind **kritische Rohstoffe** wie Silizium, Indium, Gallium und Silber. Eine **Rückgewinnung** dieser Stoffe findet aktuell nicht statt. Es wurden bereits technische Verfahren zur Rückgewinnung entwickelt, die sich jedoch aufgrund der geringen Mengen an PV-Modulen zur Verwertung als (noch) **nicht wirtschaftlich** gestalten.<sup>205</sup>

## 5.2 Stand der Technik

Eine standardisierte Verwertung von PV-Modulen ist aufgrund der **hohen Vielfalt an Behandlungstechnologien** nur grob ableitbar. Die Verfahren reichen von der Auflösung in organischen Lösungsmitteln, der Ultraschall-Bestrahlung über die Pyrolyse durch Förderband-Öfen und Wirbelschicht-

---

<sup>202</sup> Vgl. Fraunhofer IBP (2012), S. 2.

<sup>203</sup> Vgl. Wolf, J.; Brüning, R.; Nellesen, L. und Schiemann, J. (2017), S. 166ff.

<sup>204</sup> Vgl. Kummer, S. et al. (2020), S. 129.

<sup>205</sup> Vgl. Kummer, S. et al. (2020), S. 133ff.

Reaktoren bis hin zur nassen und trocken-mechanischen Behandlung oder zum chemischen Ätzen.<sup>206</sup> Die folgenden Ausführungen zum Stand der Technik lehnen sich daher an die „Technischen Anforderungen an die Behandlung und Verwertung von Elektro- und Elektronikaltgeräten“ der Mitteilung der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) 31 B an.<sup>207</sup>

Bevor die PV-Module stofflich verwertet werden können, erfolgt eine Sortierung der Modultypen. So sind Dickschichtmodule (1. Generation, c-Si-Module) und Dünnschichtmodule (2. Generation, zum Beispiel CdTe-Module) sowie silizium- und nicht siliziumbasierte PV-Module voneinander zu trennen. Eine adäquate Trennung ist dabei nur durch die Kennzeichnungen der PV-Module und durch Fachpersonal über Datenblätter möglich. Eine Trennung anhand optischer Merkmale der PV-Module kann zu unsicheren Ergebnissen führen.<sup>208</sup>

Anschließend erfolgt eine **Demontage** des Rahmens oder der sogenannten Backrails (rückseitig aufgeklebte Montageschienen), der Anschlussdose und Kabel, bevor die PV-Module dem entsprechenden Verwertungsprozess zugeführt werden.

**Siliziumbasierte Dickschicht (c-Si) und teils auch Dünnschicht-Module (a-Si)** können gemeinsam über mechanische Behandlungsverfahren verwertet werden. So zeigten Versuche, dass eine Trennung von monokristallinen und polykristallinen PV-Modulen (1. Generation) keinen Einfluss auf die Recyclingfähigkeit hat. Diese wird vermehrt durch die herstellungsspezifische Bauart der PV-Module beeinflusst.<sup>209</sup> Die mechanische Behandlung setzt sich dabei grundsätzlich aus der Konditionierung, der Klassifizierung und der Sortierung zusammen (vgl. Abbildung 11).

---

<sup>206</sup> Vgl. EU-Recycling Magazin (2022a).

<sup>207</sup> Hofmann, A. (2018).

<sup>208</sup> Vgl. Hofmann, A. (2018), S. 71.

<sup>209</sup> Vgl. Pohl, R. und Heitmann, B. (2019), S. 21.

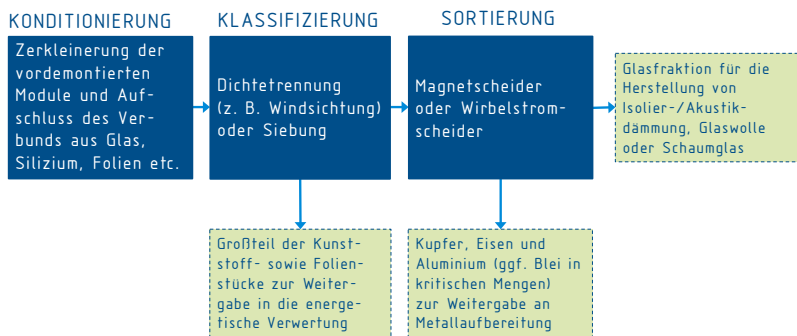


Abbildung 11: Mechanische Behandlung von siliziumbasierten PV-Modulen (eigene Darstellung)<sup>210</sup>

Das Recycling von **Dünnschicht-Modulen** kann aufgrund der Kunststofflaminierung in drei Schritten erfolgen:<sup>211</sup>

- (1) (teilweise) Delaminierung von PV-Modulen durch physikalische Zerkleinerung (Schreddern, Fräsen), durch chemische oder thermische Zersetzung der Verkapselungsfolie oder durch Kaltvermahlung
- (2) Entfernung der Glasbeschichtung (Scherben oder intaktes Substrat) und Abtrennen der nichtmetallischen Fraktion (Verkapselungsfolie, Glas) von der metallischen Fraktion (Halbleiter, Metalle)
- (3) Gewinnung und Veredelung von Elementen

Weitere Verfahren befinden sich aktuell noch in der Entwicklung. In diesem Zusammenhang wird gefordert, dass das Recycling von PV-Modulen rechtlich an **realistische, aber ambitionierte Recyclingquoten** gebunden wird, um insbesondere für Glas, Aluminium und kritische Metalle wie Indium, Gallium usw. künftig qualitativ hochwertige, geschlossene Kreisläufe zu etablieren.<sup>212</sup>

<sup>210</sup> Vgl. Hofmann, A. (2018), S. 71f.

<sup>211</sup> Vgl. Marwede, M. (2013), S. 26f.

<sup>212</sup> Vgl. Deutsche Umwelthilfe e.V. (2021), S. 11.



### 5.3 Innovative Recyclingtechnologien für PV-Module

In der Praxis, der Forschung und Entwicklung sowie im Rahmen von Pilotprojekten zu Verwertungstechnologien von PV-Modulen lässt sich eine große Vielfalt feststellen.<sup>213</sup>

Ein etablierter Prozess ist das Recyclingverfahren für **CdTe-Dünnschicht-Module** eines Unternehmens. Es nimmt die herstellereigenen Module zurück und recycelt diese. Nach der Zerkleinerung (Delaminierung) wird die Dünnschicht durch Schwefelsäure und Wasserstoffperoxid in einer Edelstahltrommel gelöst (Entfernung der Glasbeschichtung). Die Glasfraktion sowie die Folie werden abgesondert, während die Metalle in der verbliebenen Flüssigkeit in einem sich anschließenden Prozess ausgefällt werden. Tellur und Cadmium werden aus dem übrigen Filterkuchen zurückgewonnen, wobei Tellur erneut für die Produktion von PV-Modulen eingesetzt wird (Gewinnung und Veredelung der Elemente). Die Glasfraktion gelangt anschließend in das Glasrecycling, während die Kunststofffraktion für die Herstellung von Ersatzbrennstoffen genutzt wird.<sup>214</sup>

Ein ebenfalls für **CdTe/Cds-Dünnschicht-Module patentiertes Recyclingverfahren** wird durch die Antec GmbH betrieben, die kostenfrei PV-Module zurücknimmt. Hier werden die Dünnschichtmodule physikalisch in Modulfragmente zerlegt. Diese werden im Anschluss bei Temperaturen von mindestens 300 °C einer sauerstoffhaltigen Atmosphäre ausgesetzt, um die Ethylen-Vinyl-Azetat-Schichten aufzuspalten. Nach der Pyrolyse durchlaufen die Modulfragmente einen Ätzprozess (chlorhaltige Gasatmosphäre bei einer Temperatur von mehr als 400 °C), wodurch  $\text{CdCl}_2$  und  $\text{TeCl}_4$  entstehen, die anschließend kondensiert und durch Abkühlung wieder verflüssigt werden.<sup>215</sup> Das Verfahren kann laut Angaben von Seiten der betreibenden Instanz nahezu alle gewonnenen Rohstoffe für eine erneute Herstellung von Dünnschichtmodulen einsetzen.<sup>216</sup>

---

<sup>213</sup> Vgl. EU-Recycling Magazin (2022a).

<sup>214</sup> Vgl. Hofmann, A. (2017), S. 73.

<sup>215</sup> Vgl. Tao, J. und Yu, S. (2015), S. 114.

<sup>216</sup> Vgl. Antec Solar GmbH (2022).

Unternehmen und Verfahrensentwickler LuxChemtech GmbH wurde 2022 mit dem KfW Award ausgezeichnet. Dies gründet auf Technologieentwicklungen, durch die Silizium und weitere Halbleitermaterialien recycelt und dem Kreislauf wieder zugeführt werden können.<sup>217</sup> Im Ergebnis werden zerkleinerte Siliziumstücke in einer besonderen Form auf 1.500 °C erhitzt, eingeschmolzen und anschließend langsam von unten nach oben gekühlt, so dass eine gleichmäßige Kristallisation erfolgt. Nach einer Prozesszeit von fünf Tagen steht ein 900 Kilogramm schwerer **Siliziumblock in Primärwa-  
requalität** für eine erneute Produktion zur Verfügung.<sup>218</sup> Das Unternehmen ist zudem einer von 13 Mitwirkenden des EU-Projektes „**Photorama**“ (PHotovoltaic waste management – advanced Technologies for recOvery & recycling of secondary RAw MAterials from end-of-life modules). Ziel des bis 2024 laufenden Projektes ist die Entwicklung einer zuverlässigen PV-Recyclingtechnologie. Dazu soll eine Pilotanlage entwickelt werden, die ein TRL 7 vorweisen kann.

Das Projekt „**ReProSolar**“ wird mit insgesamt 4,8 Mio. Euro über EIT RawMaterials gefördert und zielt auf die Entwicklung eines hocheffizienten Verfahrens für das Recycling von PV-Altmodulen ab. So sollen alle Bestandteile der PV-Module vollständig zurückgewonnen und der Industrie reines Silizium, Silber und Glas zugeführt werden. Hierzu trennt eine neue Delaminierungstechnologie die Solarzellen effizient von der Glasplatte, um über innovative physikalisch-chemische Verfahren die Materialien zurückzugewinnen, ohne die PV-Module zerkleinern zu müssen. Die Umsetzbarkeit im industriellen Maßstab wird bei den Kooperationsbetrieben FLAXRES GmbH in Dresden und ROSI Solar in Grenoble getestet, sodass bis 2023 pro Jahr rund 5.000 Tonnen PV-Altmodule in einer Demonstrationsanlage verarbeitet werden können.<sup>219</sup>

Die FLAXRES GmbH entwickelte eine Technologie, die durch einen **hochintensiven Lichtpuls** PV-Module in wenigen Sekunden in ihre Bestandteile zerlegt. Hochintensives Licht wird dabei auf die PV-Module geworfen und von der lichtabsorbierenden Schicht, wie beispielsweise Silizium-Wafer, in

---

<sup>217</sup> Vgl. Vallerio, C. (2022).

<sup>218</sup> Vgl. Vallerio, C. (2022).

<sup>219</sup> Vgl. Evonik Industries AG (2021).

Wärme umgewandelt. Durch die schnelle Erhitzung der Materialien kann der Verbund effizient und ohne Einsatz von Chemikalien getrennt werden. Es ergeben sich daraus die sortenrein getrennten Fraktionen Glas, Aluminium, Kunststoff, Silizium mit Silber, Kabel, Stromsammelschienen und Anschlussdosen. Die Technologie ist in mobilen Containern verbaut und kann so direkt vor Ort angewandt werden.<sup>220</sup>

Die ROSI Solar GmbH ist ein Start-up, das PV-Module mit physikalischen, thermischen und sanften chemischen Prozessen, d. h. ohne Einsatz aggressiver Chemie, recycelt. Bei der Rohstoffrückgewinnung liegt der Fokus sowohl auf dem Silizium als auch auf dem Silber aus den Drähten, die den erzeugten Strom sammeln und durch das Panel leiten. Gemäß Angaben von Seiten der Herstellung kann auf diese Weise das **Silber fast vollständig in fester Form wiedergewonnen** werden. Auch das Silizium wird in reiner Form zurückgewonnen und steht zur Verwendung für eine erneute Produktion von PV-Modulen bereit.<sup>221</sup>

Das Unternehmen Rinovasol hat sich u. a. auf das **Refurbishing von Solarmodulen** spezialisiert. Beschädigungen an Solar- und Photovoltaikpaneelen werden teilweise vor Ort aufgearbeitet; nicht aufbereitbare Paneele führt man einem Recycling zu, wobei nach Unternehmensangaben bis zu 100 Prozent der Komponenten recycelt werden können.<sup>222</sup> Der entwickelte technologische Recyclingprozess umfasst u. a. das Freischlagen der einzelnen Bestandteile eines PV-Moduls sowie die Sortierung der reinen Materialfraktionen und wird in der Regel bei den jeweiligen Landeskooperationen mittels mobiler Zerlegeeinheit vor Ort durchgeführt.<sup>223</sup>

Eine weitere Zerletechnologie hat die Impulstec GmbH entwickelt.<sup>224</sup> Mit Hilfe der **Schockwellen-Zerkleinerungsanlage** EHF 400 erfolgt die Verbundwerkstofftrennung in einem Reaktor. Die Schockwellen, die elektrisch erzeugt werden, trennen Frontglas, die EVA-Beschichtung und die Silizium-

---

<sup>220</sup> Vgl. FLAXRES GmbH (2022).

<sup>221</sup> Vgl. ROSI SAS (2022).

<sup>222</sup> Vgl. EU-Recycling Magazin (2022a).

<sup>223</sup> Vgl. RINOVASOL (2022).

<sup>224</sup> Vgl. impulstec (2022).

schichten voneinander. So können pro Stunde zwischen 75 und 200 Kilogramm PV-Modulmaterial behandelt und Rückgewinnungsquoten in Höhe von drei Prozent für Silizium, einem Prozent für Kupfer und sieben bis acht Prozent für die EVA-Beschichtung erzielt werden.<sup>225</sup>

Daneben hat eine Arbeitsgruppe am Fraunhofer-Center für Silizium-Photovoltaik CSP gemeinsam mit der Reiling GmbH & Co. KG einen **skalierbaren Recyclingprozess** entwickelt, über den das Recycling aller kristallinen Silizium-PV-Module ermöglicht wird – unabhängig von der Herkunft der Module. Hierzu werden aus PV-Modul-Bruchstücken mit einer Größe von ca. 0,1 bis einem Millimeter (aus dem mechanischen Aufschluss) im Zuge verschiedener Trennprozesse Glas und Kunststoff entfernt. Durch ein sich anschließendes nasschemisches Ätzen können schrittweise die Rückseitenkontakte, die Silberkontakte, die Antireflexschichten sowie die Emitter getrennt werden. Als Produkt entsteht ein aufgereinigtes Silizium, das zu monokristallinen oder quasi-monokristallinen Ingots weiterverarbeitet und für die erneute Wafer-Produktion eingesetzt werden kann. Die am Fraunhofer ISE aus vollständig recyceltem Silizium produzierten PERC-Module<sup>226</sup> weisen einen Wirkungsgrad von 19,7 Prozent auf. Sie liegen damit zwar unter Premium-PERC-Solarzellen, die einen Wirkungsgrad von 22,2 Prozent haben, aber besitzen dennoch einen höheren Wirkungsgrad als alte, ausgediente Module.<sup>227</sup>

---

<sup>225</sup> Vgl. EU-Recycling Magazin (2022a).

<sup>226</sup> PERC-Solarzellen (Passivated Emitter and Rear Cell) zeichnen sich dadurch aus, dass sie mittels optimierter Solarzellenrückseiten das Licht besser aufnehmen und daher über eine höhere Effizienz verfügen. – Vgl. energie-experten.org (2022).

<sup>227</sup> Vgl. Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE (2022).

## 6 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Das Recycling ist eine wesentliche Strategie, um Kreisläufe zu schließen, Rohstoffe effizient zu nutzen und limitierte Ressourcen zu schonen. Aufgrund der gesetzlichen Verankerung der Kreislaufwirtschaft im deutschen Kreislaufwirtschaftsgesetz, wird Recycling der deutschen Abfallwirtschaft zugeordnet. Mit Blick auf eine Kreislaufwirtschaft im weiteren Sinne, also einer Circular Economy, ist es u. a. neben der Weiterverwendung, der Reparatur oder dem Remanufacturing ein Instrument, das dazu beiträgt, unter Beachtung ökologischer Kriterien (beispielsweise Toxizität, Energieeinsatz u. v. m.) Materialkreisläufe zu schließen.

Dieser Prozess funktioniert für einige Fraktionen wie Glas oder Aluminium bereits. Zugleich steht die Recyclingbranche – insbesondere mit Blick auf die Fraktionen Kunststoffe, Batterien und Akkumulatoren, Elektro-Altgeräte oder PV-Module – verschiedenen Herausforderungen gegenüber, die von heterogen zusammengesetzten Stoffströmen über fehlende Produktinformationen wie zum Beispiel die Rohstoffverteilung im Produkt bis hin zur Vermarktung von Rezyklaten geringerer Qualität reichen.

Für die im Rahmen der Kurzanalyse betrachteten Fraktionen hat sich gezeigt, dass auf die bestehenden Herausforderungen mit innovativen Technologieentwicklungen reagiert wird. Hier ist die Weiterentwicklung effizienter Trenntechnologien, insbesondere im Bereich der Elektro-Altgeräte, hervorzuheben, um die in den Wertstoffströmen enthaltenen Ressourcen für eine Weiterbehandlung effizient zu separieren. Auch neue Sortiertechnologien, wie beispielsweise die Wassermarkierung für Kunststoffe, können neue Anreize für die effiziente Schließung von Stoffkreisläufen setzen. Die steigende Mengenentwicklung von PV-Modulen und Lithium-Ionen-Batterien zeigt zudem, dass neue Recyclingkapazitäten nötig sind, um einen Verbleib wichtiger Rohstoffe im deutschen bzw. europäischen Wirtschaftskreislauf zu gewährleisten und Unabhängigkeit bzw. zumindest ein gewisses Maß an Resilienz gegenüber den globalen Rohstoffmärkten zu erlangen.

Eine wesentliche Voraussetzung dafür sind geschlossene, aufeinander abgestimmte Prozesse entlang der Wertschöpfungskette. Aus Sicht der Recyclingbranche sind neben der stoffstromspezifischen, also der möglichst sortenreinen Erfassung der Stoffströme, insbesondere ein recyclinggerechtes

Produktdesign und die Bereitstellung von Informationen über verbaute Werkstoffe und Bauteile essenziell, um die Ziele des zirkulären Wirtschaftens zu erfüllen und Recyclingprozesse effizient umzusetzen. Für eine ressourceneffiziente Kreislaufwirtschaft gilt daher: Die Gesamteffizienz ist die Summe der Effizienzen der einzelnen Wertschöpfungsstufen.

Im Zuge der zahlreichen Diskussionen zur Gestaltung einer ressourceneffizienten Kreislaufwirtschaft wird immer deutlicher, dass der Recyclingbranche technische Grenzen hinsichtlich der geschlossenen Rückführung von Rohstoffen gesetzt sind. Recyclingprozesse können letztlich nur so effizient arbeiten, wie es die Voraussetzungen erlauben, die bereits durch das Produktdesign bzw. die Herstellung der Produkte gesetzt worden sind.

Eine ressourceneffiziente Kreislaufwirtschaft braucht daher die Mitarbeit aller Agierenden, um die Gesamteffizienz zu steigern. Erste Dialogprozesse wie der zum VDI White Paper<sup>228</sup>, die Dialogplattform Recyclingrohstoffe<sup>229</sup> oder Initiativen wie das Forum Rezyklat<sup>230</sup> sind nötig, um die Wertschöpfungsstufen zu verbinden, ein Verständnis für die darin stattfindenden Abläufe zu schaffen und einen transparenten Kreislauf zu etablieren. Dies liegt in der Verantwortung aller am Kreislauf beteiligten Agierenden, denn „um eine wirkliche Weiterentwicklung zu erreichen, muss über das KrWG hinausgedacht werden, wenn die Transformation der industriellen Prozesse in eine Circular Economy gelingen soll“<sup>231</sup>.

Auf politischer Ebene wurde dazu im Koalitionsvertrag festgelegt, dass in einer „Nationalen Kreislaufwirtschaftsstrategie“ bestehende rohstoffpolitische Strategien gebündelt werden.<sup>232</sup> Neben weiteren Ambitionen sollen insbesondere die langlebige, wiederverwendbare, recycelbare und möglichst reparierbare Gestaltung der Produkte gefördert und so die Idee einer ressourceneffizienten Kreislaufwirtschaft weiter forciert werden.

---

<sup>228</sup> Vgl. VDI e.V. (2022).

<sup>229</sup> Vgl. Dialogplattform Recyclingrohstoffe (2022).

<sup>230</sup> Vgl. Forum Rezyklat (2022).

<sup>231</sup> Vgl. Gosten, A. (2022), S. 4.

<sup>232</sup> Vgl. Bundesregierung der Bundesrepublik Deutschland (2021), S. 42.

---

## TEIL 2: FACHGESPRÄCH

## 7 ERGEBNISSE DES FACHGESPRÄCHS

### 7.1 Programm

- |            |  |
|------------|--|
| Moderation | Dr. Martin Vogt, Geschäftsführer, VDI Zentrum Ressourceneffizienz  |
| Top 1      | <b>Recycling von Lithium-Ionen-Batterien: Chancen und Herausforderungen für Europa</b><br><br>Dr. Christoph Neef, Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (ISI) |
| Top 2      | <b>Problemstellung Lithium-Ionen-Batterien-Verwertung</b><br><br>Georgios Chryssos, GRS Batterien  |
| Top 3      | <b>Diskussionsrunde Teil I</b>   |
| Top 4      | <b>Umweltfreundliches Recycling von Lithium-Ionen-Batterien</b><br><br>Julius Schumacher, Duesenfeld GmbH  |
| Top 5      | <b>Industrielle Demontage von Batteriemodulen und E-Motoren: DeMoBat</b><br><br>Eduard Gerlitz, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), wbk Institut für Produktionstechnik   |
| Top 6      | <b>Diskussionsrunde Teil II</b>  |



## 7.2 Einführung

Am 24. Februar 2022 fand ein Fachgespräch zum Thema „Innovative Recyclingtechnologien von Industriebatterien“ mit 16 Teilnehmerinnen und Teilnehmern aus Forschung, Industrie, Politik und fachlichen Netzwerken statt. Hierzu hatte das VDI Zentrum Ressourceneffizienz eingeladen. Die Teilnehmenden des Fachgesprächs diskutierten im Zuge dessen, welchen Herausforderungen sich Agierende der Wertschöpfungskette „Industriebatterien“ stellen müssen, um die notwendige Hochskalierung der Recyclingkapazitäten vorrangig von Lithium-Ionen-Batterien erfolgreich umzusetzen.

Zur Einordnung des Begriffs der Industriebatterie wird für die vorliegende Dokumentation der § 3 (5), Batteriegesetz herangezogen. Entsprechend werden Industriebatterien als „Batterien, die ausschließlich für industrielle, gewerbliche oder landwirtschaftliche Zwecke, für Elektrofahrzeuge jeder Art oder zum Vortrieb von Hybridfahrzeugen bestimmt sind“, festgelegt.

## 7.3 Mengenentwicklung von neuen Industriebatterien

Zu Beginn des Fachgesprächs wurde zunächst dargestellt, dass insbesondere aufgrund der Elektromobilität als wesentlichen Treiber hohe zweistellige Wachstumsraten des Batteriemarkts in Europa zu erwarten sind. Dies betrifft nicht zuletzt neue Industriebatterien aus derzeit stark ansteigenden Produktionskapazitäten in Europa. So wurde u. a. angemerkt, dass beim Anfahren und Einstellen der Prozesse Ausschüsse verursacht würden, noch bevor eine stete Produktion erfolgt. Diese Makulaturen können bis zu 50 Prozent des Anlagenoutputs betragen und stellen bereits jetzt einen großen Anteil der zu recycelnden Industriebatterien dar. Und auch in Zukunft werden diese Produktionsabfälle die Recyclingmengen maßgeblich mit beeinflussen.

Weitere wesentliche Mengen an Neubatterien stammen unterdessen aus Importen aus dem asiatischen Raum und bedeuten für den europäischen Markt einen nicht zu vernachlässigenden Ressourcenimport. Der Wertschöpfungsprozess der Industriebatterien ist jedoch lückenhaft. Die Verbringung von Altfahrzeugen in außereuropäische Länder ist bereits seit Dekaden ein bekanntes Problem. Aufgrund dessen wird davon ausgegangen, dass sich die Verbringung von Elektro-Altfahrzeugen in gleicher Weise etablieren wird.

Dieser Prozess bedeutet wiederum einen Ressourcenverlust für den europäischen Raum. An dieser Stelle sehen daher alle Teilnehmenden akuten Handlungsbedarf, um die - auch vor dem aktuellen politischen Hintergrund - dringend benötigten Rohstoffe in der europäischen Wertschöpfungskette zu halten.

Lithium-Ionen-Batterien machen bei Neuinverkehrbringungen einen Mengenanteil von ca. 40 Prozent aus und werden auch in den nächsten zehn Jahren die dominierende Batterietechnologie sein. Hierfür sprechen ebenso die aktuell getätigten Investments in neue Produktionsanlagen, denn bereits bei der Anlagenplanung erfolgt eine Festlegung auf die Zellchemie. Eine nachträgliche Umstellung ist nicht nur technisch sehr aufwändig, sondern zudem äußerst kostenintensiv.

Andere Batterietypen wie beispielsweise Natrium- und Feststoffbatterien werden ebenfalls einer Weiterentwicklung unterliegen, allerdings werden sie im Vergleich zu den Lithium-Ionen-Batterien eine untergeordnete Rolle einnehmen. Es wurde jedoch auch darauf verwiesen, dass insbesondere aufgrund der sich derzeit rasant entwickelnden Elektrochemie Langzeitentwicklungen tendenziell schwer abzuschätzen sind.

#### **7.4 Regulatorische Entwicklungen für Industriebatterien**

Die stark wachsenden, aber auch die bereits im Markt befindlichen Mengen an neuen Industriebatterien erfordern somit die Schaffung und Etablierung einer funktionierenden Recyclinginfrastruktur. Der wertschöpfungskettenumfassende Regulierungsvorschlag der Europäischen Kommission reagiert auf die entsprechenden Marktentwicklungen und hält fest, dass es ab 2022 eine Verpflichtung zum Recycling geben soll.

Im Zuge dieser Verpflichtung wurden Recyclingeffizienzen (Rückgewinnungsraten der stofflichen Verwertung) festgelegt, die sich bis zum Jahr 2030 für Kupfer, Kobalt und Nickel auf 98 Prozent und für Lithium auf 90 Prozent belaufen. Bezüglich des Sprungs von 95 Prozent ab 2026 auf 98 Prozent ab 2030 für die Metalle Kobalt, Kupfer und Nickel wurde festgehalten, dass die aktuellen technologischen Innovationen diese Anpassung durchaus leisten können.

Zudem wird der Einsatz von Rezyklaten aus Altbatterien in neuen Batterien verpflichtend, um die sukzessive Entwicklung eines Recyclingmarkts zu forcieren. In diesem Zusammenhang wurde angemerkt, dass die Einhaltung der ab 2030 regulatorisch geforderten Recyclingquoten unklar ist. Mehrere Gründe wurden hierfür angeführt:

- Da das Recycling nicht in Konkurrenz mit der Primärförderung von insbesondere Lithium stehen wird und zudem technische Limitationen Rezyklatmenge und -qualität begrenzen, wird eingeschätzt, dass ein maximaler Rezyklateinsatz von fünf Prozent, stammend aus Altbatterien, zu erwarten ist. Darüber hinausgehende Rezyklatquoten können unter Umständen die Produktqualität gefährden. Man müsste daher auf weitere Sekundärrohstoffströme aus anderen Industrien zurückgreifen. Dieser Schritt erscheint bei Nickel, Kobalt und Kupfer möglich, gestaltet sich im Fall von Lithium jedoch problematisch.
- Des Weiteren sind aktuell etablierte Recyclingkapazitäten vor allem produktionsnahen Recyclingprozessen, die die vorgenannten Ausschüsse verwerten, zuzurechnen. Diese Ausschüsse zählen jedoch nicht zu End-of-Life-Batterien und können entsprechend nicht in der zu erzielenden Recyclingquote berücksichtigt werden.
- Die Lebensdauer von Industriebatterien liegt bei durchschnittlich 15 Jahren und kann sich bei einer Überführung von gebrauchten Industriebatterien in eine Second-Life-Anwendung sogar noch verlängern. Dadurch verschiebt sich die Verfügbarkeit der Industriebatterien für den Recyclingmarkt zeitlich nach hinten. Es wurde darauf hingewiesen, dass diese längere Verfügbarkeit jedoch nicht in Konkurrenz zu neuen Geschäftsmodellen (beispielsweise „Nutzen statt Besitzen“) stehen sollte, die sich gleichermaßen positiv auf die Lebensdauer wie auf die Kreislaufführung auswirken. Es gelte daher, Industriebatterien in die Etablierung derartiger Geschäftsmodelle zu integrieren.

- Der Ort des Recyclings ist gemäß dem Regulierungsvorschlag nicht auf Europa beschränkt. Hieraus entsteht die Herausforderung, entsprechende Anreize zu schaffen, um die Industriebatterien und die darin enthaltenen Ressourcen dauerhaft im europäischen Markt zu halten.

Die Verfügbarkeit gesicherter Mengen an End-of-Life-Batterien wird durch die Teilnehmenden auch vor dem Hintergrund der Verbringung von Elektro-Altfahrzeugen als kritisch eingeschätzt. Die genannten Problemstellungen werden jedoch in der Erstellung einer gültigen Berechnungsmethode für die Recyclingquoten im Regulierungsvorschlag der Europäischen Kommission berücksichtigt. Für 2027 ist eine Revision der Richtlinie vorgesehen, mit der etwaige Anpassungen in der Festlegung der Recyclingquoten einhergehen. Dennoch sollen die hochangesetzten Recyclingquoten als politisches Signal wirken und entsprechend Anreize für die Entwicklung innovativer Recyclingprozesse für Batterien schaffen.

## 7.5 Entwicklungen des Recyclingmarkts

### 7.5.1 Entwicklung von Recyclingkapazitäten

Die Entwicklung des Recyclingmarkts für Batterien ist aktuell sehr dynamisch. Die Industrie kündigt stetig den Aufbau neuer Recyclingkapazitäten an. Die installierten Prozesse sind dabei sehr divers in ihrer Gestaltung und daher schwer miteinander zu vergleichen. Es wurde somit nur grob geschätzt, dass sich die Recyclingkapazitäten von rund 33 Kilotonnen im August 2021 auf rund 72 Kilotonnen im Februar 2022 mehr als verdoppelt haben. Hierzu wurde angemerkt, dass derzeit lediglich auf eine tatsächliche Recyclingkapazität von ca. 40 Kilotonnen zurückgegriffen werden kann, da einige Marktpartizipierende zwar in die Recyclingkapazitäten eingerechnet werden, diese jedoch de facto kein hochwertiges Recycling von Batterien betreiben. Hierzu zählen beispielsweise Schrotthändler, die ausgediente Batterien nur vom Gehäuse trennen. Zudem werden insbesondere neu am Markt vorgestellte Technologien bezüglich der Hochskalierung kritisch bewertet. Hier können Machbarkeit und Wirtschaftlichkeit durch sogenannte Test- und Demonstrationszentren überprüft werden.

### 7.5.2 Entwicklung von Recyclingmengen und Zusammensetzung

Die verfügbaren ebenso wie die geplanten Recyclingkapazitäten reichen aktuell (noch) nicht aus, um die stark wachsenden Mengen an zu recycelnden Industriebatterien (inklusive aller Produktionsabfälle bzw. -ausschüsse) umzusetzen. Es wird zudem geschätzt, dass bis 2025 ca. 100 Kilotonnen und bis 2030 schon knapp 250 Kilotonnen jährlich verwertet werden müssen. Insbesondere für Produktionsabfälle haben sich bereits Partnerschaften zwischen Recyclerinnen und Recyclern sowie Zellherstellerinnen und Zellherstellern etabliert. Hier ist jedoch noch offen, ob und wie sich diese Strukturen in Zukunft weiterentwickeln. Kooperationen, die produktionsnahe Kreisläufe aufbauen, sind insofern sinnvoll, da – anders als End-of-Life-Batterien – Produktionsabfälle bzw. Produktionsausschüsse sortenreiner und weniger verschmutzt vorliegen. Zudem wurde darauf hingewiesen, dass die Wertschöpfungskette der Industriebatterien global aufgestellt ist. Der effiziente und nachhaltige Umgang mit der Wertschöpfungsstruktur setze eine Vernetzung insbesondere mit den asiatischen Märkten voraus. Da der Recyclingmarkt jedoch sehr jung ist, fällt hier der Gestaltungsspielraum noch sehr groß aus.

Die Zusammensetzung des gesamten Stoffstroms der Batterierückläufe ändert sich über die Zeit. Aktuell befinden sich hauptsächlich Batterien aus Kleinanwendungen im Recyclingstrom, die mittelfristig durch Produktionsabfälle bzw. Ausschüsse ersetzt werden. Langfristig werden Batterien aus Elektrofahrzeugen den Wertstoffstrom dominieren. Hier wurde eingeworfen, dass die Wirtschaftlichkeit der Recyclingprozesse in Abhängigkeit zu den zu recycelnden Batterietypen steht. Gewonnene Wertstoffe aus hochwertigen Lithium-Ionen-Batterien wie beispielsweise Kupfer, Kobalt, Nickel und Mangan ermöglichen einen wirtschaftlichen Betrieb. Die Inhaltsstoffe von Lithium-Eisenphosphat-Batterien (LFP) sind hingegen geringwertiger und erschweren ein wirtschaftliches Recycling. Aus aktueller Sicht stehen daher keine ausreichenden Verwertungskapazitäten für LFP-Batterien zur Verfügung. An dieser Stelle wurde angemerkt, dass der im Rahmen des Fachgesprächs vorgestellte Recyclingprozess der Duesenfeld GmbH neben hoch-

wertigen Batterien auch LFP-Batterien in die Verwertung miteinschließt. Zusätzlich würden bestehende Forschungsbedarfe zur wirtschaftlichen LFP-Verwertung mittels laufender Projekte adressiert.

Aus Sicht der Ressourceneffizienz bietet der Zustand der angelieferten Batterien Material- und Energieeinsparungspotenzial. Ein beachtlicher Teil der Lithium-Ionen-Batterien, so die Einschätzung, könnten einer Second-Life-Anwendung zugeführt werden. Diese Batterien (u. a. Ausschuss) entsprechen jedoch nicht dem Serienstandard der OEMs (Original Equipment Manufacturer, Erstausrüster) und werden deshalb von deren Seite nicht für ein „Second-Life“ freigegeben. Zudem steht die Produkthaftung für Second-Life-Batterien oft in der Diskussion. Hierzu wurde eingeworfen, dass die Gewährleistung von Seiten der Vertreibenden und nicht durch den OEM getragen würde. Jedoch führe die Umsetzung in der Praxis oftmals zu rechtlichen Unsicherheiten.

### 7.5.3 Abschätzung von Investitionsbedarfen

Die abgeschätzten Investitionskosten für einen beispielhaft entworfenen hydrometallurgischen Prozess und einen Heißprozess liegen bei ca. drei bis vier Millionen Euro je Kilotonne Batterie und Jahr. Die einzelnen Agierenden der Wertschöpfungskette „Industriebatterien“ schätzen dabei die benötigten Initialinvestitionen unterschiedlich ein. Die Betreibenden sowie die OEMs erwarten jährliche Initialinvestitionen zum Erreichen der nötigen Recyclingkapazität von ca. 2,7 Milliarden Euro, während von Seiten des Maschinen- und Anlagenbaus bis 2040 mit Kosten in Höhe von in etwa fünf Milliarden Euro gerechnet wird. In diesem Bereich kann ein notwendiges Investment für die benötigten Recyclingkapazitäten abgeschätzt werden.

### 7.5.4 Innovative Recyclingtechnologien

Einer der Teilnehmenden stellte den innovativen Prozess zum Recycling von Lithium-Ionen-Batterien aller Typen (NMC, NCA, LFP, LCO, LMO, LTO) der Duesenfeld GmbH vor. Die Vorteile liegen u. a. in einer hohen Recyclingeffizienz und einem energiearmen Prozess durch den Verzicht auf eine hochenergetische thermische Verwertung. Auf diese Weise kann auf energiein-

tensive und teure Prozesskomponenten wie den Gaswäscher zur Eliminierung der Fluorwasserstoffe (HF) verzichtet, der Genehmigungsaufwand verringert und eine leicht skalierbare Technologie angeboten werden.

Dem Aufbereitungsprozess ist die Demontage vorgeschaltet, die aktuell händisch vorgenommen wird. Jedoch verändert sich sukzessive die Verarbeitungsweise der angelieferten Batterien, die insbesondere bei den Cell2pack-Batterien eine händische Demontage aufgrund von Verklebungen oder Verschweißungen unwirtschaftlich macht. Hier wird künftig der Demontageprozess um eine Schredder-Einheit erweitert werden.

Gleiche Erkenntnisse teilte der Beitrag, der die Forschungsergebnisse des Projektes DeMoBat vorstellte. Das Projekt untersucht die automatisierte Demontage von Industriebatterien. Es wurde festgehalten, dass sich die grundsätzliche Architektur des Designs nicht ändern wird, jedoch die Art der Verarbeitung eine ressourceneffiziente Demontage erschwert. Ein recyclinggerechtes Design würde hier zu einem ressourceneffizienteren Recycling führen. Diese Verantwortung liegt bei den OEMs, die wiederum Anforderungen an die Recyclingfähigkeit stellen können. Diesbezüglich müssen jedoch aktuell keine Auflagen eingehalten werden, sodass abzusehen ist, dass seitens der OEMs aus Wirtschaftlichkeitsgründen keine Anstrengungen unternommen werden. Dies kann sich jedoch mit der sich verknappenden Rohstoffverfügbarkeit ändern.

Nach Ansicht der Teilnehmenden gelte es daher, den Recyclingprozess mit einer höchstmöglichen Flexibilität auszulegen, um auf die sich ändernden Batteriedesigns und die sich ändernde Zellchemie möglichst zeitnah antworten zu können. Wie bereits festgehalten wurde, ist die Variantenvielfalt der am Markt verfügbaren Industriebatterien enorm und damit ein flexibler Recyclingprozess notwendig, um den Wertschöpfungskreislauf möglichst effizient zu schließen. Hier wäre es hilfreich, Informationen zum Aufbau und über die stoffliche Zusammensetzung, insbesondere der Elektrolyte in Form von QR-Codes oder einer Möglichkeit zur Auslesung der Batterien, zu erhalten. Dies würde die effizientere Gestaltung des Recyclingprozesses ermöglichen (beispielsweise chargenweise Verarbeitung der Elektrolyte) und die erzielbare Rezyklatmenge erhöhen. Die Herausgabe solch sensibler Daten ist aus Sicht des OEMs jedoch schwierig und aktuell nicht gängig.

### 7.5.5 Einsatz von Sekundärrohstoffen aus dem Batterie-recycling

Die Recyclinginfrastruktur für Batterien ist jung und führt dazu, dass ein Teil der derzeit produzierten Mengen an potenziellen Rezyklaten noch zu gering ist, um am Markt Abnehmende zu finden. Ein Beispiel ist der Markt für zurückgewinnbare Elektrolyte bzw. Lösemittelgemische. Aktuell sind die generierten Mengen zu gering, um einen Wiedereinsatz in der Primärbatterieproduktion zu erwirken. Zudem besteht im Fall der Elektrolyte die Schwierigkeit, dass diese genau auf die Zellchemie der originären Batterie zugeschnitten sind. Entsprechend schwierig ist es daher zum jetzigen Zeitpunkt, die rückgewonnenen Lösemittelgemische für die Herstellung von Primärbatterien einzusetzen. Diese gehen derzeit in die thermische Verwertung. Forschungsprojekte nehmen sich dieses Themas jedoch sukzessive an.

### 7.6 Zusammenfassung

Die Wertschöpfungskette für Industriebatterien ist geprägt durch ein dynamisches Wachstum. Sowohl die Produktionskapazitäten von Neubatterien als auch die Recyclingkapazitäten werden stetig ausgebaut. Die regulatorischen Randbedingungen setzen wichtige Signale und reagieren angemessen früh auf den sich entwickelnden Markt. Die genaue Auslegung von insbesondere Recyclingquoten ist unterdessen diversen Unsicherheiten unterworfen, die jedoch über eine geplante Revision adressiert werden.

Die Entwicklung innovativer Technologien gestaltet sich ebenfalls sehr dynamisch. Gute-Praxis-Beispiele wie der Recyclingprozess der Duesenfeld GmbH zeigen einerseits die Möglichkeiten und Potenziale einer kreislaufgeführten Wertschöpfungskette für Industriebatterien und fördern andererseits die Herausforderungen zu Tage, die es noch zu bestreiten gilt. Hierbei sind Forschungsprojekte wie das Projekt DeMoBat hilfreich, denn solche Projekte zeigen u. a. die Notwendigkeit auf, ein recyclinggerechtes Design für eine gesteigerte Ressourceneffizienz zu etablieren und Demontage- bzw. Recyclingprozesse möglichst flexibel zu gestalten, um schnell und adäquat auf die Variantenvielfalt der Industriebatterien reagieren zu können.



---

## LITERATURVERZEICHNIS

**2012/19/EU:2012-07:** Europäisches Parlament und Europäischer Rat, Richtlinie 2012/19/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 4. Juli 2012 über Elektro- und Elektronik-Altgeräte Text von Bedeutung für den EWR, Amtsblatt der Europäischen Union, Straßburg.

**ACCUREC Recycling GmbH (2022):** Forschung & Entwicklung [online]. ACCUREC Recycling GmbH [abgerufen am: 28.10.2022], verfügbar unter: <https://accurec.de/forschung-und-entwicklung>

**Adamas Intelligence (2022):** Passenger EV Battery Chemistries: LFP for the Massive, NCM for the Majority [online], 12.12.2022 [abgerufen am: 20.02.2023], verfügbar unter: <https://www.adamasintel.com/lfp-for-the-massive-ncm-for-the-majority/>

**AIM - European Brands Association (2021):** Pioneering Digital Watermarks | Holy Grail 2.0 [online]. AIM - European Brands Association [abgerufen am: 26.10.2022], verfügbar unter: <https://www.digitalwatermarks.eu/>

**Antec Solar GmbH (2022):** Garantie & Recycling [online]. Antec Solar GmbH [abgerufen am: 02.12.2022], verfügbar unter: <https://www.antec-solar.de/solarservice/garantie-and-recycling/>

**APK AG (2022):** Newcycling® - wie aus Verpackungsabfällen hochwertige Kunststoffgranulate werden [online]. APK AG, 07.06.2021 [abgerufen am: 26.10.2022], verfügbar unter: <https://www.apk-ag.de/newcycling/prozess/>

**Arkin, C.; Caterbow, A.; Chemnitz, C.; Duran, C.; Feit, S.; Fernandez, M.; Flood, C.; Fuhr, L.; Grimberg, E.; Gürtler, S.; Guerrero, L.; Hausmann, J.; von, H.; Kallee, U.; Keith, C.; Knoblauch, D.; Lauwigi, C.; Mederake, L.; Moun, D.; Muffett, C.; Patton, J.; Rehmer, C.; Schächtele, K.; Seeger, D.; Speranskaya, O.; Tat, E. und Ziebarth, N. (2021):** Plastikatlas - Daten und Fakten über eine Welt voller Kunststoff. 6. Auflage. Heinrich-Böll-Stiftung; Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland, Berlin.

**Aurubis AG (2022):** Technologie des Recyclings [online]. Aurubis AG, 01.12.2022 [abgerufen am: 02.12.2022], verfügbar unter: <https://www.aurubis.com/produkte/recycling/Technologie>

**Baltac, S. und Slater, S. (2019):** Batteries on wheels: the role of battery electric cars in the EU power system and beyond. Element Energy, London [abgerufen am: 28.10.2022], verfügbar unter: [http://www.element-energy.co.uk/wordpress/wp-content/uploads/2019/06/Element\\_Energy\\_Batteries\\_on\\_wheels\\_Public-report\\_4th-June-2019.pdf](http://www.element-energy.co.uk/wordpress/wp-content/uploads/2019/06/Element_Energy_Batteries_on_wheels_Public-report_4th-June-2019.pdf)

**Batterieforum Deutschland (2018):** ReALBatt - Projektdatenbank [online]. Kompetenznetzwerk Lithium-Ionen-Batterien e. V. [abgerufen am: 31.10.2022], verfügbar unter: <https://db.batterieforum-deutschland.de/verbundprojekte/realbatt/>

**Batterieforum Deutschland (2022):** Projektdatenbank [online]. Kompetenznetzwerk Lithium-Ionen-Batterien e. V. [abgerufen am: 28.10.2022], verfügbar unter: <https://www.batterieforum-deutschland.de/projektdatenbank/>

**Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz (2022):** Innovative Recyclingverfahren für Elektroschrott [online] – Teilprojekt 10: IRVE. Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz [abgerufen am: 02.12.2022], verfügbar unter: [https://www.stmuv.bayern.de/themen/ressourcenschutz/forcycle/forcycle2/teilprojekt\\_10.htm](https://www.stmuv.bayern.de/themen/ressourcenschutz/forcycle/forcycle2/teilprojekt_10.htm)

**Bechlarz, D. (2022):** Enzymatische PET-Bio-Recycling-Anlage in Frankreich geplant. In: plastverarbeiter [abgerufen am: 26.10.2022], verfügbar unter: <https://www.plastverarbeiter.de/markt/enzymatische-pet-bio-recycling-anlage-in-frankreich-geplant-439.html>

**Bitkom e.V. (2021):** Mehr als 200 Millionen Alt-Handys lagern in deutschen Wohnungen [online]. Bitkom e.V. [abgerufen am: 27.10.2022], verfügbar unter: <https://www.bitkom.org/Presse/Presseinformation/Mehr-als-200-Millionen-Alt-Handys-lagern-in-deutschen-Wohnungen>

**Bittner, A.; Flegler, A.; Neef, C.; Rostek, L.; Stijepic, D.; Tercero Espinoza, L. A. und Thielmann, A. (2021):** Quantifizierung Batterierecycling Kurzversion. Fraunhofer ISI, Karlsruhe.

**BMUV (2018):** Bundesumweltministerin Schulze legt 5-Punkte-Plan für weniger Plastik und mehr Recycling vor - BMUV-Pressemitteilung [online]. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz, 30.09.2021 [abgerufen am: 24.10.2022], verfügbar unter: <https://www.bmuv.de/pressemitteilung/bundesumweltministerin-schulze-legt-5-punkte-plan-fuer-weniger-plastik-und-mehr-recycling-vor>

**BMUV (2022a):** Das Elektro- und Elektronikgerätegesetz (ElektroG) - FAQ [online]. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz [abgerufen am: 08.12.2022], verfügbar unter: <https://www.bmuv.de/faqs/elektronikgeraetegesetz-elektrog>

**BMUV (2022b):** FAQ Recht auf Reparatur [online]. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz, 15.08.2022 [abgerufen am: 08.12.2022], verfügbar unter: <https://www.bmuv.de/themen/nachhaltigkeit-digitalisierung/konsum-und-produkte/faq-recht-auf-reparatur>

**Borealisgroup (2023):** Borealis und TOMRA eröffnen hochmoderne Pilotanlage für Kunststoff-Rezyklat - Borealis [online], 21.02.2023 [abgerufen am: 21.02.2023], verfügbar unter: <https://www.borealisgroup.com/news/borealis-und-tomra-er%C3%B6ffnen-hochmoderne-pilotanlage-f%C3%BCr-kunststoff-rezyklat>

**Brunn, M. (2021):** Standard-NIR Technologie erkennt Marker. In: Recycling magazin [abgerufen am: 26.10.2022], verfügbar unter: <https://www.recyclingmagazin.de/2021/09/08/standard-nir-technologie-erkennt-marker/?msclid=f335385dd10f11ecacb53f69792b4046>

**Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (2021):** Lieferketten und Abbaubedingungen im artisanalen Kobalt-Kupfersektor der DR Kongo. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover [abgerufen am: 27.10.2022], verfügbar unter: [https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Min\\_rohstoffe/Downloads/lieferketten\\_abbaubedingungen\\_artisanaler\\_Cu-Co-Sektor\\_DR\\_Kongo\\_de.html](https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Min_rohstoffe/Downloads/lieferketten_abbaubedingungen_artisanaler_Cu-Co-Sektor_DR_Kongo_de.html)

**Bundesregierung der Bundesrepublik Deutschland (2020):** Deutsches Ressourceneffizienzprogramm III 2020 - 2023 Programm zur nachhaltigen Nutzung und zum Schutz der natürlichen Ressourcen - ProgRess III [abgerufen am: 24.06.2020], verfügbar unter: [https://www.bmu.de/fileadmin/Daten\\_BMU/Download\\_PDF/Ressourceneffizienz/progress\\_iii\\_programm\\_bf.pdf](https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Ressourceneffizienz/progress_iii_programm_bf.pdf)

**Bundesregierung der Bundesrepublik Deutschland (2021):** Koalitionsvertrag der Ampel-Koalition aus SPD, Grüne und FDP für die Wahlperiode 2021-2025 - Mehr Fortschritt wagen. Bündnis für Freiheit, Gerechtigkeit und Nachhaltigkeit. Bundesregierung der Bundesrepublik Deutschland, Berlin [abgerufen am: 31.10.2022], verfügbar unter: <https://www.bundesregierung.de/breg-de/service/gesetzesvorhaben/koalitionsvertrag-2021-1990800>

**Bundesrepublik Deutschland (2015):** Gesetz über das Inverkehrbringen, die Rücknahme und die umweltverträgliche Entsorgung von Elektro- und Elektronikgeräten – ElektroG [abgerufen am: 08.12.2022], verfügbar unter: [https://www.gesetze-im-internet.de/elektrog\\_2015/](https://www.gesetze-im-internet.de/elektrog_2015/)

**Bundestag der Bundesrepublik Deutschland (2020):** Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen – Kreislaufwirtschaftsgesetz KrWG [abgerufen am: 29.04.2021], verfügbar unter: [http://www.bgbl.de/xaver/bgbl/start.xav?startbk=Bundesanzeiger\\_BGBl&jumpTo=bgbl120s2232.pdf](http://www.bgbl.de/xaver/bgbl/start.xav?startbk=Bundesanzeiger_BGBl&jumpTo=bgbl120s2232.pdf)

**bvse (2019):** 32 Millionen Elektro-Altgeräte in deutschen Haushalten [online]. bvse-Fachverband Schrott, E-Schrott und Kfz-Recycling [abgerufen am: 08.12.2022], verfügbar unter: <https://www.bvse.de/schrott-elektronik-geraete-recycling/nachrichten-schrott-eschrott-kfz/3990-32-millionen-elektro-altgeraete-in-deutschen-haushalten.html>

**Catena-X (2023):** Catena-X Automotive Network | Catena-X [online], 21.02.2023 [abgerufen am: 21.02.2023], verfügbar unter: <https://catena-x.net/de/>

**Charpentier Poncelet, A.; Helbig, C.; Loubet, P.; Beylot, A.; Muller, S.; Villeneuve, J.; Laratte, B.; Thorenz, A.; Tuma, A. und Sonnemann, G. (2022):** Losses and lifetimes of metals in the economy. In: Nature Sustainability, 5 (8), S. 717–726. Nature Sustainability. doi:10.1038/s41893-022-00895-8

**CIRPASS (21.02.2023):** CIRPASS – Digital Product Passport [online], 21.02.2023 [abgerufen am: 21.02.2023], verfügbar unter: <https://cirpassproject.eu/dpp-in-a-nutshell/>

**Crocodile Project (2018):** First of a kind commercial Compact system for the efficient Recovery Of COBalt Designed with novel Integrated LEading technologies – Recovering Cobalt [online]. Crocodile Project [abgerufen am: 03.11.2022], verfügbar unter: <https://h2020-crocodile.eu/>

**Der Tagesspiegel (2022):** Export von Abfall: Deutschland schickt deutlich weniger Plastikmüll ins Ausland [online]. In: Der Tagesspiegel, 2022 [abgerufen am: 24.10.2022], verfügbar unter: <https://www.tagesspiegel.de/politik/deutschland-schickt-deutlich-weniger-plastikmull-ins-ausland-6596410.html>

**Deutsche Umwelthilfe (2022):** Position on Waste electrical and electronic equipment - evaluating the EU rules - Position Paper of Environmental Action Germany (DUH). Deutsche Umwelthilfe e.V., Radolfzell [abgerufen am: 08.12.2022], verfügbar unter: [https://ec.europa.eu/info/law/better-regulation/have-your-say/initiatives/13420-Elektro-und-Elektronik-Altgerate-Bewertung-der-EU-Vorschriften/F3353321\\_de](https://ec.europa.eu/info/law/better-regulation/have-your-say/initiatives/13420-Elektro-und-Elektronik-Altgerate-Bewertung-der-EU-Vorschriften/F3353321_de)

**Deutsche Umwelthilfe e. V. (2021):** Weißbuch zur Stärkung der Wiederverwendung und des Recyclings von Photovoltaik-Modulen. Deutsche Umwelthilfe e.V., Radolfzell [abgerufen am: 21.10.2022], verfügbar unter: [https://www.duh.de/fileadmin/user\\_upload/download/Pressemitteilungen/Kreislaufwirtschaft/210310\\_Wei%C3%9Fbuch\\_Kreislaufwirtschaft\\_Solar-module\\_st%C3%A4rken\\_DEU\\_FINAL.pdf](https://www.duh.de/fileadmin/user_upload/download/Pressemitteilungen/Kreislaufwirtschaft/210310_Wei%C3%9Fbuch_Kreislaufwirtschaft_Solar-module_st%C3%A4rken_DEU_FINAL.pdf)

**DGAW – Deutsche Gesellschaft für Abfallwirtschaft e. V. (2021):** Höhere Rezyklatqualität durch neue Sortiertechnologien? DGAW – Deutsche Gesellschaft für Abfallwirtschaft e.V, Berlin [abgerufen am: 26.10.2022], verfügbar unter: [https://www.dgaw.de/fileadmin/Presse\\_und\\_Stellungnahmen/PM\\_Sortiertechnologien\\_final.pdf](https://www.dgaw.de/fileadmin/Presse_und_Stellungnahmen/PM_Sortiertechnologien_final.pdf)

**Digital Watermarks (2022):** Validation of second prototype machine takes HolyGrail 2.0 one step closer to industrial scale [online]. AIM - European Brands Association, 15.06.2022 [abgerufen am: 26.10.2022], verfügbar unter: <https://www.digitalwatermarks.eu/post/validation-of-second-prototype-machine-takes-holygrail-2-0-one-step-closer-to-industrial-scale>

**Dialogplattform Recyclingrohstoffe (2022):** Die Dialogplattform Recyclingrohstoffe [online]. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe [abgerufen am: 08.12.2022], verfügbar unter: [https://www.recyclingrohstoffe-dialog.de/Recyclingrohstoffe/DE/Home/recyclingrohstoffe\\_node.html](https://www.recyclingrohstoffe-dialog.de/Recyclingrohstoffe/DE/Home/recyclingrohstoffe_node.html)

**DIN e. V. (2021):** Schub fürs Kunststoff-Recycling [online] - Neuer Standard für die Klassifizierung von Kunststoff-Rezyklaten veröffentlicht. DIN e. V. [abgerufen am: 26.10.2022], verfügbar unter: <https://www.din.de/de/din-und-seine-partner/presse/mitteilungen/schub-fuers-kunststoff-recycling-827024>

**Doose, S.; Mayer, J. K.; Michalowski, P. und Kwade, A. (2021):** Challenges in Ecofriendly Battery Recycling and Closed Material Cycles: A Perspective on Future Lithium Battery Generations. In: *Metals*, 11 (2), S. 291. Metals [abgerufen am: 28.10.2022]. doi:10.3390/met11020291

**Dornbusch, H.-J.; Hannes, L.; Santjer, M.; Böhm, C.; Wüst, S.; Zwisele, B.; Kern, M.; Siepenkothen, H.-J. und Kanthak, M. (2020):** Vergleichende Analyse von Siedlungsrestabfällen aus repräsentativen Regionen in Deutschland zur Bestimmung des Anteils an Problemstoffen und verwertbaren Materialien. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau [abgerufen am: 27.10.2022], verfügbar unter: [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/texte\\_113-2020\\_analyse\\_von\\_siedlungsrestabfaellen\\_abschlussbericht.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/texte_113-2020_analyse_von_siedlungsrestabfaellen_abschlussbericht.pdf)

**Duesenfeld GmbH (2022):** Lizenzierung der Duesenfeld Patente [online]. Duesenfeld GmbH [abgerufen am: 28.10.2022], verfügbar unter: <https://www.duesenfeld.com/lizenzierung.html>

**Dürfeld, K. (2021):** Lithium-Dendriten auf der Spur: Wie zerstörerische Strukturen in Batterien wachsen [online]. Helmholtz-Zentrum Berlin für Materialien und Energie [abgerufen am: 27.10.2022], verfügbar unter: [https://www.helmholtz-berlin.de/pubbin/news\\_seite?nid=23163&sprache=de&seitenid=74699](https://www.helmholtz-berlin.de/pubbin/news_seite?nid=23163&sprache=de&seitenid=74699)

**Ecologic Institut gemeinnützige GmbH (2022):** Tracer Based Sorting | Plastik in der Umwelt [online]. Ecologic Institut gemeinnützige GmbH [abgerufen am: 26.10.2022], verfügbar unter: <https://bmbf-plastik.de/de/taxonomy/term/162>

**energie-experten.org (2022):** PERC-Solarzelle: Rückseitenpassivierung, Effizienz und Degradation [online]. Greenhouse Media GmbH [abgerufen am: 08.12.2022], verfügbar unter: <https://www.energie-experten.org/erneuerbare-energien/solarenergie/solarzelle/perc>

**Erneuerbar mobil (2022):** EcoBatRec [online] - Demonstrationsanlage für ein kostenneutrales, ressourceneffizientes Processing ausgedienter Li-Ion Batterien der Elektromobilität. Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, 24.10.2022 [abgerufen am: 28.10.2022], verfügbar unter: <https://www.erneuerbar-mobil.de/projekte/ecobatrec>

**EU-Recycling Magazin (2022a):** Photovoltaikanlagen: Das Recycling entwickelt sich. In: EU-Recycling Magazin, S. 32 [abgerufen am: 28.10.2022], verfügbar unter: <https://eu-recycling.com/Archive/34578>

**EU-Recycling Magazin (2022b):** Polysecure und Zeiss entwickeln neue Sortiertechnologie. In: EU-Recycling Magazin [abgerufen am: 26.10.2022], verfügbar unter: <https://eu-recycling.com/Archive/34178?msclid=fc20e8f7d12a11ecadb6b5575b4a7bbb>

**EuRIC (2022):** Evaluating EU rules on waste from electrical and electronic equipment (WEEE) – Feedback from the European recycling industry [abgerufen am: 29.03.2023], verfügbar unter: [https://ec.europa.eu/info/law/better-regulation/have-your-say/initiatives/13420-Elektro-und-Elektronik-Altgerate-Bewertung-der-EU-Vorschriften/F3353376\\_de](https://ec.europa.eu/info/law/better-regulation/have-your-say/initiatives/13420-Elektro-und-Elektronik-Altgerate-Bewertung-der-EU-Vorschriften/F3353376_de)

**Europäische Kommission (2020):** Vorschlag für eine Verordnung des europäischen Parlaments und des Rates über Batterien und Altbatterien, zur Aufhebung der Richtlinie 2006/66/EG und zur Änderung der Verordnung (EU) 2019/1020 [abgerufen am: 31.10.2022], verfügbar unter: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/HTML/?uri=CELEX:52020PC0798&from=EN>

**Europäische Kommission (2022):** Europäische Batterie-Allianz. Europäische Kommission, Brüssel [abgerufen am: 27.10.2022], verfügbar unter: [https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/de/IP\\_22\\_1256](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/de/IP_22_1256)

**Europäisches Parlament (2022):** Circular economy: definition, importance and benefits [online], verfügbar unter: <https://www.europarl.europa.eu/news/en/headlines/economy/20151201STO05603/circular-economy-definition-importance-and-benefits>

**European Commission (2023):** F3353337 European WEEE Registers Network (EWRN) [online], 16.02.2023 [abgerufen am: 20.02.2023], verfügbar unter: [https://ec.europa.eu/info/law/better-regulation/have-your-say/initiatives/13420-Elektro-und-Elektronik-Altgerate-Bewertung-der-EU-Vorschriften/F3353337\\_de](https://ec.europa.eu/info/law/better-regulation/have-your-say/initiatives/13420-Elektro-und-Elektronik-Altgerate-Bewertung-der-EU-Vorschriften/F3353337_de)

**European Recycling Platform (2022):** Comments on the evaluation of EU rules on waste electrical and electronic equipment. European Recycling Platform, Paris/Mainz [abgerufen am: 08.12.2022], verfügbar unter: [https://ec.europa.eu/info/law/better-regulation/have-your-say/initiatives/13420-Elektro-und-Elektronik-Altgerate-Bewertung-der-EU-Vorschriften/F3353387\\_de](https://ec.europa.eu/info/law/better-regulation/have-your-say/initiatives/13420-Elektro-und-Elektronik-Altgerate-Bewertung-der-EU-Vorschriften/F3353387_de)

**Evonik Industries AG (2021):** Evonik ist Teil des EU-Verbundprojekts Re-ProSolar zum vollständigen Recycling von Photovoltaik-Modulen - Evonik Industries [online]. Evonik Industries AG, 15.06.2021 [abgerufen am: 02.12.2022], verfügbar unter: <https://corporate.evonik.com/de/evonik-ist-teil-des-eu-verbundprojekts-reprosolar-zum-vollstaendigen-recycling-von-photovoltaik-modu-159496.html>

**EWRN (2022):** Call for Evidence for an Evaluation – Waste electrical and electronic equipment - Evaluating the EU rules. european weee registers network, Nürnberg [abgerufen am: 08.12.2022], verfügbar unter: [https://ec.europa.eu/info/law/better-regulation/have-your-say/initiatives/13420-Elektro-und-Elektronik-Altgerate-Bewertung-der-EU-Vorschriften/F3353337\\_de](https://ec.europa.eu/info/law/better-regulation/have-your-say/initiatives/13420-Elektro-und-Elektronik-Altgerate-Bewertung-der-EU-Vorschriften/F3353337_de)

**FLAXRES GmbH (2022):** Technologie [online]. FLAXRES GmbH [abgerufen am: 02.12.2022], verfügbar unter: <https://www.flaxres.com/de/technologie/>

**Fluchs, S. (2021):** Batterierecycling: Potenziale zur Reduzierung der Rohstoffabhängigkeit – IW-Kurzbericht 35/2021. Institut der deutschen Wirtschaft, Köln [abgerufen am: 27.10.2022], verfügbar unter: <https://www.iwkoeln.de/studien/sarah-fluchs-potenziale-zur-reduzierung-der-rohstoffabhaengigkeit-511335.html>

**Folayan, T.-O.; Lipson, A. L.; Durham, J. L.; Pinegar, H.; Liu, D. und Pan, L. (2021):** Direct Recycling of Blended Cathode Materials by Froth Flotation. In: Energy Technology, 9 (10), S. 2100468. ISSN 2194-4288 [abgerufen am: 31.10.2022]. doi:10.1002/ente.202100468

**Forum Rezyklat (2022):** Für Unternehmen [online]. GS1 Germany GmbH [abgerufen am: 26.10.2022], verfügbar unter: <https://www.forum-rezyklat.de/fuer-unternehmen/>

**Fraunhofer IBP (2012):** Life Cycle Assessment (LCA) screening of the Maltha recycling process for Si-PV modules. Fraunhofer IBP - Department Life Cycle Engineering, Stuttgart [abgerufen am: 28.10.2022], verfügbar unter: [www.pvcycle.org.uk/wp-content/uploads/Exec-Summary-LCA-Screening-of-a-Recycling-process-of-silicon-based-PV-modules-2012-07.pdf](http://www.pvcycle.org.uk/wp-content/uploads/Exec-Summary-LCA-Screening-of-a-Recycling-process-of-silicon-based-PV-modules-2012-07.pdf)

**Fraunhofer UMSICHT (2022):** Recycling von Elektronik, Elektronikschrott und Elektrogeräten [online]. Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT, Institutsteil Sulzbach-Rosenberg [abgerufen am: 31.10.2022], verfügbar unter: <https://www.umsicht-suro.fraunhofer.de/de/unsere-loesungen/icycle-technologie-plattform.html>

**Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF (2021):** Upcycling: Neue Werkstoffe aus PET-Abfällen des gelben Sacks [online]. Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF [abgerufen am: 31.10.2022], verfügbar unter: <https://www.lbf.fraunhofer.de/de/presse/presseinformationen/upcycling.html>



**Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA (2022):** Industrielle Demontage von Batteriemodulen und E-Motoren DeMoBat [online]. Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA [abgerufen am: 28.10.2022], verfügbar unter: <https://www.ipa.fraunhofer.de/de/referenzprojekte/DeMoBat.html>

**Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE (2022):** PERC-Solarzellen aus 100 Prozent recyceltem Silizium [online]. Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE [abgerufen am: 02.12.2022], verfügbar unter: <https://www.ise.fraunhofer.de/de/presse-und-medien/presseinformationen/2022/perc-solarzellen-aus-recyceltem-silizium-hergestellt.html>

**Fraunhofer-Institut für Verfahrenstechnik und Verpackung IVV (2022):** Kreislaufwirtschaft für phthalathaltige PVC-Fußböden [online]. Fraunhofer-Institut für Verfahrenstechnik und Verpackung IVV [abgerufen am: 31.10.2022], verfügbar unter: <https://www.ivv.fraunhofer.de/de/recycling-umwelt/recycling-von-kontaminierten-kunststoffen/circular-flooring.html>

**Fraunhofer-Institut für Verfahrenstechnik und Verpackung IVV (2023):** Nachhaltige Kreislaufwirtschaft durch Künstliche Intelligenz bei Kunststoffabfällen [online], 21.02.2023 [abgerufen am: 21.02.2023], verfügbar unter: <https://www.ivv.fraunhofer.de/de/presseinformationen/bmbf-foerdermassnahme-ki-anwendungshub-kunststoffverpackungen.html>

**Gao, H.; Yan, Q.; Xu, P.; Liu, H.; Li, M.; Liu, P.; Luo, J. und Chen, Z. (2020):** Efficient Direct Recycling of Degraded LiMn2O4 Cathodes by One-Step Hydrothermal Relithiation. In: ACS applied materials & interfaces, 12 (46), S. 51546–51554. ACS applied materials & interfaces [abgerufen am: 31.10.2022]. doi:10.1021/acsami.0c15704

**Gosten, A. (2022):** Ist das Kreislaufwirtschaftsgesetz Teil des Problems oder Teil der Lösung auf dem Weg in die Kreislaufwirtschaft? Berliner Abfallwirtschafts- und Energie-Konferenz. TK Verlag GmbH, Berlin [abgerufen am: 08.12.2022], verfügbar unter: [https://www.dgaw.de/fileadmin/data/download/pdf/220516\\_BAEK\\_KrWG\\_Go\\_TK\\_final.pdf](https://www.dgaw.de/fileadmin/data/download/pdf/220516_BAEK_KrWG_Go_TK_final.pdf)

**greenBatt (2021a):** DIGISORT - Digitalisierung mechanischer Sortierprozesse [online]. Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und Systeme IKTS, 28.04.2021 [abgerufen am: 31.10.2022], verfügbar unter: <https://www.greenbatt-cluster.de/de/projekte/digisort/>

**greenBatt (2021b):** EarLiMet - Early Stage-Metallrückgewinnung für das energie- und ressourceneffiziente Recycling von Li-Ionen-Batterien [online]. Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und Systeme IKTS, 14.07.2021 [abgerufen am: 31.10.2022], verfügbar unter: <https://www.greenbatt-cluster.de/de/projekte/earlimet/>

**greenBatt (2021c):** EVanBatter - Entwicklung einer gegenüber Verunreinigungen robusten Resyntheseroute von Aktivmaterialien für Lithium-Ionen-Batterien [online]. Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und Systeme IKTS, 14.07.2021 [abgerufen am: 31.10.2022], verfügbar unter: <https://www.greenbatt-cluster.de/de/projekte/evanbatter/>

**greenBatt (2021d):** Kompetenzcluster Recycling & Grüne Batterie [online]. Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und Systeme IKTS, 22.07.2021 [abgerufen am: 28.10.2022], verfügbar unter: <https://www.greenbatt-cluster.de/de/>

**greenBatt (2021e):** LOWVOLMON - Monitoring schwerflüchtiger Elektrolyte in der mechanischen Recyclingprozesskette [online]. Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und Systeme IKTS, 14.07.2021 [abgerufen am: 31.10.2022], verfügbar unter: <https://www.greenbatt-cluster.de/de/projekte/lowvolmon/>

**greenBatt (2021f):** Projekte [online]. Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und Systeme IKTS, 20.09.2021 [abgerufen am: 28.10.2022], verfügbar unter: <https://www.greenbatt-cluster.de/de/projekte/>

**greenBatt (2021g):** PyroLith - Entwicklung eines stabilen Prozesses auf Basis der Prozessketten Pyrometallurgie-Schlackenaufbereitung-Hydrometallurgie zur Rückgewinnung von Li aus Mn-haltigen Schlacken [online]. Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und Systeme IKTS, 14.07.2021 [abgerufen am: 31.10.2022], verfügbar unter: <https://www.greenbatt-cluster.de/de/projekte/pyrolith/>

**greenBatt (2023):** DemoSens - Digitalisierung mechanische Aufbereitung [online], 14.07.2021 [abgerufen am: 28.03.2023], verfügbar unter: <https://www.greenbatt-cluster.de/de/projekte/demosens/>

**GS1 Germany GmbH (2022):** GS1 Standards im Überblick [online]. GS1 Germany GmbH [abgerufen am: 31.10.2022], verfügbar unter: <https://www.gs1-germany.de/gs1-standards/>

**Hagelüken, C. (2022):** Recycling von (Edel)metallen aus Elektroaltgeräten [online]. In: Porth, M. und Schüttrump, H., Hg. Wasser, Energie und Umwelt, Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, S. 101 - 111. ISBN 9783658356071 [abgerufen am: 08.12.2022], verfügbar unter: <https://www.springerprofessional.de/recycling-von-edel-metallen-aus-elektroaltgeraeten/20122876>

**Halleux, V. (2022):** New EU regulatory framework for batteries - Setting sustainability requirements. EPRS - European Parliamentary Research Service [abgerufen am: 26.10.2022], verfügbar unter: [https://www.europarl.europa.eu/thinktank/en/document/EPRS\\_BRI\(2021\)689337](https://www.europarl.europa.eu/thinktank/en/document/EPRS_BRI(2021)689337)

**hamos GmbH (2023):** Elektrostatischer Separator für saubere Kunststoffe [online], 17.03.2023 [abgerufen am: 17.03.2023], verfügbar unter: <https://www.hamos.com/produkte/elektrostatische-kunststoff-kunststoff-separatoren-hamos-eks>

**Helmholtz-Zentrum Dresden - Rossendorf e. V. (2021):** Wenn Batterien zu Schaum werden [online] - HZDR-Doktorandin mit Konzept zum verbesserten Batterie-Recycling beim Falling Walls Wettbewerb. Helmholtz-Zentrum Dresden - Rossendorf e. V. [abgerufen am: 31.10.2022], verfügbar unter: <https://www.hzdr.de/db/Cms?pOid=64639&pNid=0>

**Hofmann, A. (2017):** LAGA Bericht 31a - Umsetzung des Elektro- und Elektronikgerätegesetzes. Anforderungen an die Entsorgung von Elektro- und Elektronikaltgeräten. Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall, München [abgerufen am: 21.10.2022], verfügbar unter: [https://www.laga-online.de/documents/m-31-a\\_1517834714.pdf](https://www.laga-online.de/documents/m-31-a_1517834714.pdf)

**Hofmann, A. (2018):** Mitteilung der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) 31 B. Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall, München [abgerufen am: 28.10.2022], verfügbar unter: [https://www.laga-online.de/documents/m-31b-18-04-2018-neu\\_1527151713.pdf](https://www.laga-online.de/documents/m-31b-18-04-2018-neu_1527151713.pdf)

**impulstec (2022):** HighTech Recycling [online]. ImpulsTec GmbH [abgerufen am: 08.12.2022], verfügbar unter: <https://impulstec.com/#elektronik-schrottreycling>

**IRENA und IEA-PVPS (2016):** End-of-Life Management: Solar Photovoltaic Panels. International Renewable Energy Agency und International Energy Agency Photovoltaic Power Systems. [abgerufen am: 22.02.2023], verfügbar unter: <https://www.irena.org/publications/2016/Jun/End-of-life-management-Solar-Photovoltaic-Panels>

**Janz, A.; Prelle, R.; Müller, F. und Bilitewski, B. (2009):** Grenzüberschreitende Ströme von Elektroaltgeräten. In: Müll und Abfall, (3), S. 126-132. Müll und Abfall. doi:10.37307/j.1863-9763.2009.03.07

**Jongbloed, K. und Kessens, L. (2021):** Mehrheit der Deutschen für ein Pfand auf Smartphones [online]. Deutsche Bundesstiftung Umwelt [abgerufen am: 27.10.2022], verfügbar unter: <https://www.dbu.de/news/mehrheit-der-deutschen-fuer-ein-pfand-auf-smartphones/>

**Juschkat, K. (2021):** Warum Lithium-Ionen-Akkus explodieren können. In: elektrotechnik Automatisierung [abgerufen am: 27.10.2022], verfügbar unter: <https://www.elektrotechnik.vogel.de/warum-lithium-ionen-akkus-explodieren-koennen-a-1002438/>

**Kempkens, W. (2021):** Deutschland produziert Lithium bald selbst. In: BWK Energie [abgerufen am: 27.10.2022], verfügbar unter: <https://www.ingenieur.de/fachmedien/bwk/energiespeicher/deutschland-produziert-lithium-bald-selbst/>

**Knappe, F.; Reinhardt, J.; Kauertz, B.; Oetjen-Dehne, R.; Buschow, N.; Ritthoff, M.; Wilts, H. und Lehmann, M. (2021):** Technische Potenzialanalyse zur Steigerung des Kunststoffrecyclings und des Rezyklateinsatzes. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau [abgerufen am: 26.10.2022], verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/technische-potenzialanalyse-zur-steigerung-des>

**Köhnlechner, R.; Jung, H. und Geisler, W. (2012):** Kunststoffrecycling - Elektrostatische Trennung separiert auch schwarze Kunststoffe [online]. In: Process [abgerufen am: 17.03.2023], verfügbar unter: <https://www.process.vogel.de/kunststoffrecycling-elektrostatische-trennung-separiert-auch-schwarze-kunststoffe-a-386970/?p=2>

**Kompetenznetzwerk Lithium-Ionen-Batterien e. V. (2018):** Batterie 2020 - Förderung [online]. Kompetenznetzwerk Lithium-Ionen-Batterien e. V. [abgerufen am: 28.10.2022], verfügbar unter: <https://batterie-2020.de/foerderung/?x=165?x=166>

**Krüger, F. (2020):** ATA - Ad-hoc-Ausschuss Kennzeichnung / Identifizierung von Kunststoffen. Bund-Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall, Berlin [abgerufen am: 09.11.2022], verfügbar unter: [https://www.laga-online.de/documents/kik\\_bericht\\_18\\_1591617236.-v\\_06022020f](https://www.laga-online.de/documents/kik_bericht_18_1591617236.-v_06022020f)

**KUKA Deutschland GmbH (2022):** Recycling-Roboter im Einsatz gegen Elektroschrott [online]. KUKA Deutschland GmbH, 05.04.2022 [abgerufen am: 02.12.2022], verfügbar unter: <https://www.kuka.com/de-de/branchen/loesungsdatenbank/2022/04/votechnik-roboter-recycelt-elektroschrott>

**Kummer, S.; Strobel, A.; Kohlmeyer, R.; Kitazume, C.; Oehme, I. und Schnepel, C. (2020):** Empfehlungen des UBA für die Weiterentwicklung der Behandlungsanforderungen nach ElektroG. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau [abgerufen am: 28.10.2022], verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/empfehlungen-des-uba-fuer-die-weiterentwicklung-der>

**Kunz Rechtsanwälte (2021):** Neue gesetzliche Regelungen für Kunststoffprodukte und -abfälle [online]. Kunz Rechtsanwälte [abgerufen am: 26.10.2022], verfügbar unter: <https://www.kunzrechtsanwaelte.de/aktuelles/news/neue-gesetzliche-regelungen-fuer-kunststoffprodukte-und-abfaelle>

**Land Nordrhein-Westfalen (2022):** Batterie-Recycling in Ibbenbüren nimmt Fahrt auf: Wirtschafts- und Innovationsminister Prof. Pinkwart überreicht Letter of Intent [online]. Land Nordrhein-Westfalen [abgerufen am: 28.10.2022], verfügbar unter: <https://www.land.nrw/pressemitteilung/batterie-recycling-ibbenbueren-nimmt-fahrt-auf-wirtschafts-und-innovationsminister>

**Land.NRW (2021):** Wettbewerb „InnovationUmweltwirtschaft.NRW“: 34 Projekte ausgewählt | Land.NRW [online], 29.03.2023 [abgerufen am: 29.03.2023], verfügbar unter: <https://www.land.nrw/pressemitteilung/wettbewerb-innovationumweltwirtschaftnrw-34-projekte-ausgewaehlt>

**Lange, U. (2022):** VDI ZRE Fachgespräch "Circular Economy und ressourceneffiziente Kreislaufwirtschaft" - Der Weg ins zirkuläre Wirtschaften. VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH, Berlin [abgerufen am: 10.02.2023], verfügbar unter: <https://www.ressource-deutschland.de/service/publikationen/detailseite/fachgesprach-circular-economy/>

**Lange, U. (2021):** Wahre Kreislaufwirtschaft. In: Der Mittelstand, (6-2021), S. 66 [abgerufen am: 03.11.2022], verfügbar unter: [https://www.bvmw.de/fileadmin/01-Presse\\_und\\_News/Publikationen/DER\\_Mittelstand/2021/06-2021/6-21\\_DER\\_Mittelstand\\_web.pdf](https://www.bvmw.de/fileadmin/01-Presse_und_News/Publikationen/DER_Mittelstand/2021/06-2021/6-21_DER_Mittelstand_web.pdf)

**Lindner, C.; Schmitt, J. und Hein, J. (2020):** Stoffstrombild Kunststoffe in Deutschland 2019 – Kurzfassung der Conversio Studie. Conversio Market & Strategy GmbH, Mainaschaff [abgerufen am: 03.11.2022], verfügbar unter: [https://www.conversio-gmbh.com/res/News\\_Media/2020/Kurzfassung\\_Stoffstrombild\\_2019.pdf](https://www.conversio-gmbh.com/res/News_Media/2020/Kurzfassung_Stoffstrombild_2019.pdf)

**Lindner, C.; Schmitt, J.; Fischer, E. und Hein, J. (2022):** Stoffstrombild Kunststoffe in Deutschland 2021: Zahlen und Fakten zum Lebensweg von Kunststoffen – Kurzfassung der Conversio Studie. Conversio Market & Strategy GmbH [abgerufen am: 19.12.2022], verfügbar unter: [https://www.bvse.de/dateien2020/2-PDF/01-Nachrichten/03-Kunststoff/2022/Kurzfassung\\_Stoffstrombild\\_2021\\_13102022\\_1\\_.pdf](https://www.bvse.de/dateien2020/2-PDF/01-Nachrichten/03-Kunststoff/2022/Kurzfassung_Stoffstrombild_2021_13102022_1_.pdf)

**LionCare GmbH (2022):** Defekt, Brand oder Explosion – Folgen von beschädigten Lithium-Batterien und Akkus [online]. LionCare GmbH [abgerufen am: 27.10.2022], verfügbar unter: <https://www.lion-care.com/defekt-brand-und-explosion-von-lithium-ionen-akkus>

**Löhle, S.; Schmiedel, U. und Bartnik, S. (2020):** Analyse der Datenerhebungen nach ElektroG und UStatG über das Berichtsjahr 2018 zur Vorbereitung der EU-Berichtspflichten 2020. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau [abgerufen am: 28.10.2022], verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/analyse-datenerhebungen-elektrog-ustatg-2018>

**Löhle, S.; Schmiedel, U.; Bartnik, S. und Oehme, I. (2019):** Analyse der Datenerhebungen nach ElektroG und UStatG über das Berichtsjahr 2017 zur Vorbereitung der EU-Berichtspflichten 2019. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau [abgerufen am: 28.10.2022], verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/analyse-der-datenerhebungen-nach-elektrog-ustatg-1>

**Martens, H. und Goldmann, D. (2016):** Recycling von Elektro- und Elektronikgeräten. In: Martens, H. und Goldmann, D., Hg. Recyclingtechnik, Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, S. 439–475. ISBN 978-3-658-02785-8.

**Marwede, M. (2013):** Cycling critical absorber materials of CdTe- and CIGS-photovoltaics – Material efficiency along the life-cycle. Universität Augsburg, Augsburg [abgerufen am: 31.10.2022], verfügbar unter: [d-nb.info/1077703074/34](http://d-nb.info/1077703074/34)

**MEILO Gesellschaft zur Rückgewinnung sortierter Werkstoffe mbH & Co. KG (2022):** Hochwertiger Output [online]. MEILO Gesellschaft zur Rückgewinnung sortierter Werkstoffe mbH & Co. KG [abgerufen am: 26.10.2022], verfügbar unter: <https://www.meilo-germsheim.de/leistungen/hochwertiger-output>

**Meyer, K. (2022):** Neue Bundesregierung muss Recht auf Reparatur wirksam umsetzen: Der Teufel liegt im Detail [online]. Runder Tisch Reparatur e.V. [abgerufen am: 08.12.2022], verfügbar unter: <https://runder-tisch-reparatur.de/neue-bundesregierung-muss-recht-auf-reparatur-wirksam-umsetzen-der-teufel-liegt-im-detail/>

**Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie und Mobilität des Landes Rheinland-Pfalz (2022):** Eder: „Ein Quantensprung beim Kunststoffrecycling“ [online]. Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie und Mobilität des Landes Rheinland-Pfalz [abgerufen am: 26.10.2022], verfügbar unter: [https://mkuem.rlp.de/de/pressemeldungen/detail/news/News/detail/eder-ein-quantensprung-beim-kunststoffrecycling/?no\\_cache=1&chHash=72835fe61f468f9cf982c6c7214300ff](https://mkuem.rlp.de/de/pressemeldungen/detail/news/News/detail/eder-ein-quantensprung-beim-kunststoffrecycling/?no_cache=1&chHash=72835fe61f468f9cf982c6c7214300ff)

**Monneron-Enaud, B. und Kramer, J. (2021):** Bakterien helfen beim Recycling von Elektroschrott. In: *BIOSpektrum*, 27 (2), S. 214. ISSN 0947-0867 [abgerufen am: 02.12.2022]. doi:10.1007/s12268-021-1551-2

**Neef, C.; Schmalz, T. und Thielmann, A. (2021):** Recycling von Lithium-Ionen-Batterien: Chancen und Herausforderungen für den Maschinen- und Anlagenbau - Kurzstudie im Auftrag der IMPULS-Stiftung. Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI, Karlsruhe [abgerufen am: 03.11.2022], verfügbar unter: [https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/cct/2021/VDMA\\_Kurzstudie\\_Batterierecycling.pdf](https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/cct/2021/VDMA_Kurzstudie_Batterierecycling.pdf)

**Newsroom Kunststoffverpackungen (2021):** BASF und Cyclos-HTP untersuchen mechanische Recyclingfähigkeit von PA/PE-Verbundfolien [online]. IK Industrievereinigung Kunststoffverpackungen e.V., 09.10.2021 [abgerufen am: 04.11.2022], verfügbar unter: <https://newsroom.kunststoffverpackungen.de/2021/07/07/recyclingfaehigkeit-von-pa-pe-verbundfolien/>

**packaging journal (2020):** Neues Schwarz ermöglicht das Recycling dunkler Kunststoffe. In: *packaging journal* [abgerufen am: 26.10.2022], verfügbar unter: <https://packaging-journal.de/neues-schwarz-ermoeeglicht-das-recycling-dunkler-kunststoffe/>

**Paschetag, M.; Scholl, S. und Eichert, C. (2022):** Wie lösen wir das Recyclingproblem der Mehrschichtfolie? In: plastverarbeiter [abgerufen am: 26.10.2022], verfügbar unter: <https://www.plastverarbeiter.de/verarbeitungsverfahren/kunststoffrecycling/rezyklatherstellung-aus-multilayer-folien-und-tiefziehschalen-558.html>

**Plastverarbeiter (2021):** Flaschen aus enzymatisch recyceltem PET vorgestellt. In: plastverarbeiter [abgerufen am: 26.10.2022], verfügbar unter: <https://www.plastverarbeiter.de/verarbeitungsverfahren/flaschen-aus-enzymatisch-recyceltem-pet-vorgestellt.html>

**Pohl, R. und Heitmann, B. (2019):** Aufarbeitung von Altmodulen und Rückführung von Wertstoffen in den Stoffkreislauf (EoL-Cycle) : Abschlussbericht. Reiling Glas Recycling GmbH & Co. KG, Marienfeld [abgerufen am: 31.10.2022], verfügbar unter: [https://www.tib.eu/de/suchen?tx\\_tibsearch\\_search%5Baction%5D=download&tx\\_tibsearch\\_search%5Bcontrol%5D=Download&tx\\_tibsearch\\_search%5Bdocid%5D=TIBKAT%3A1738022528&cHash=f02ec6ed714c40d72d0e55142f0dc764#download-mark](https://www.tib.eu/de/suchen?tx_tibsearch_search%5Baction%5D=download&tx_tibsearch_search%5Bcontrol%5D=Download&tx_tibsearch_search%5Bdocid%5D=TIBKAT%3A1738022528&cHash=f02ec6ed714c40d72d0e55142f0dc764#download-mark)

**Polysecure GmbH (2022):** Verlässlich Sortieren [online]. Polysecure GmbH [abgerufen am: 26.10.2022], verfügbar unter: <https://www.polysecure.eu/verlaesslich-sortieren>

**R-Cycle (2022a):** Mit dem offenen digitalen Standard R-Cycle Kunststoffe recyceln [online]. ProData GmbH [abgerufen am: 26.10.2022], verfügbar unter: <https://www.r-cycle.org/>

**R-Cycle (2022b):** Pilotprojekt: Digitale Produktpässe für smarte Digital-Watermark-Blasform-Verpackungen [online]. ProData GmbH [abgerufen am: 26.10.2022], verfügbar unter: <https://www.r-cycle.org/intelligente-blasform-verpackung-identifizierbare-digitales-wasserzeichen-flasche-kanister/>

**Redux GmbH (2022):** Nachhaltiges Recycling von Lithium-Ionen-Akkus [online]. Redux GmbH, 04.02.2022 [abgerufen am: 28.10.2022], verfügbar unter: <https://www.redux-recycling.com/de/services/lithium-ionenbatterien/>



**Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule (RWTH) Aachen (2021):** Demonstrationszentrum Batterie-Recycling [online]. Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule (RWTH) Aachen, 08.12.2021 [abgerufen am: 28.10.2022], verfügbar unter: <https://www.controlling.rwth-aachen.de/cms/Controlling/Forschung/Forschungsprojekte/Abgeschlossene-Projekte/~mnwew/Demonstrationszentrum-Batterie-Recycling/>

**RINOVASOL (2022):** Technologie zum Modulrecycling [online] - Kurze Wege - große Wirkung. Rinovasol Global Services B. V. [abgerufen am: 02.12.2022], verfügbar unter: <https://www.rinovasol.de/modul-re-using/technologie>

**RITTEC Umwelttechnik GmbH (2022):** revolPET® Ein Kreislauf für Kunststoff [online]. RITTEC Umwelttechnik GmbH [abgerufen am: 26.10.2022], verfügbar unter: <https://www.rittec.eu/loesungen/revol-pet.html>

**Ritthoff, M.; Müller, A.; Hopfensack, L.; Brüning, R.; Wolf, J. und Piehl, F. (2022):** Methoden und Normen zur Bewertung der Reparierbarkeit von Elektro- und Elektronikgeräten - Stärkung der Materialeffizienz unter der Ökodesign- Richtlinie. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau [abgerufen am: 08.12.2022], verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/methoden-normen-zur-bewertung-der-reparierbarkeit>

**ROSI SAS (2022):** Recycling von Photovoltaik-Modulen [online]. ROSI SAS [abgerufen am: 02.12.2022], verfügbar unter: <https://www.rosi-solar.com/de/recycling-von-photovoltaik-modulen/>

**Sander, K. und Schilling, S. (2010):** Optimierung der Steuerung und Kontrolle grenzüberschreitender Stoffströme bei Elektroaltgeräten / Elektroschrott. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau [abgerufen am: 08.12.2022], verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/optimierung-steuerung-kontrolle>

**Sander, K.; Otto, S. J.; Rödiger, L. und Wagner, L. (2018):** Behandlung von Elektroaltgeräten (EAG) unter Ressourcen- und Schadstoffaspekten - Abschlussbericht. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau [abgerufen am: 02.12.2022], verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/behandlung-von-elektroaltgeraeten-eag-unter>

**Saubermacher (2022):** Zweites Leben: Alte E-Autobatterien sinnvoll nutzbar [online]. Saubermacher Dienstleistungs AG, 05.07.2022 [abgerufen am: 28.10.2022], verfügbar unter: <https://saubermacher.at/presse/stationaerer-speicher-aus-alten-e-autobatterien/>

**Sauer, F.; Choi, B.-K.; Beck, G. und Wickleder, M. (2019):** Recovery of Tantalum from Printed Circuit Boards - An Overview of the IRETA Project. In: World of Metallurgy - Erzmetall, (72), S. 216-222 [abgerufen am: 02.12.2022], verfügbar unter: [https://www.researchgate.net/publication/334882118\\_Recovery\\_of\\_Tantalum\\_from\\_Printed\\_Circuit\\_Boards\\_-\\_An\\_Overview\\_of\\_the\\_IRETA\\_Project](https://www.researchgate.net/publication/334882118_Recovery_of_Tantalum_from_Printed_Circuit_Boards_-_An_Overview_of_the_IRETA_Project)

**Schick, B. (2022):** Neu entdecktes Enzym zersetzt PET in Rekordzeit. In: Kunststoff Magazin [abgerufen am: 26.10.2022], verfügbar unter: <https://www.kunststoff-magazin.de/zerkleinerung-recycling/neu-entdecktes-enzym-zersetzt-pet-in-rekordzeit.htm>

**Schiller, C.; Amrhein, U.; Ehrlinspiel, M.; Jacob, A. M.; Endres, H.-J. und Wilts, H. (2020):** Wertsachen. Warum der Markt für recycelten Kunststoff nicht funktioniert ...und wie sich das ändern könnte. Röchling Stiftung GmbH, Mannheim, Polyproblem Report [abgerufen am: 20.10.2022], verfügbar unter: <https://polyproblem.org/2021/report-wertsachen/>

**Sojka, R.; Pan, Q. und Billmann, L. (2020):** Comparative study of Li-ion battery recycling processes. ACCUREC Recycling GmbH, Krefeld [abgerufen am: 28.10.2022], verfügbar unter: <https://accurec.de/wp-content/uploads/2021/04/Accurec-Comparative-study.pdf>

**Statistisches Bundesamt (2021):** Export von Plastikmüll 2020: 33 % weniger Kunststoffabfälle ausgeführt als vor zehn Jahren [online]. Statistisches Bundesamt, 05.04.2022 [abgerufen am: 24.10.2022], verfügbar unter: [https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2021/03/PD21\\_N016\\_51.html](https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2021/03/PD21_N016_51.html)

**Statistisches Bundesamt (2022a):** 2021 wurde 25 % weniger Plastikmüll exportiert als im Vorjahr, Wiesbaden [abgerufen am: 19.12.2022], verfügbar unter: [https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2022/06/PD22\\_N035\\_51.html](https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2022/06/PD22_N035_51.html)

**Statistisches Bundesamt (2022b):** Zur Erstbehandlung angenommene Elektro- und Elektronikaltgeräte [online]. Statistisches Bundesamt, 11.02.2022 [abgerufen am: 28.10.2022], verfügbar unter: <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/Abfallwirtschaft/Tabellen/liste-erstbehandlung.html;jsessionid=2696AD8D4EEF20F9E98D209A5AAE49ED.live741#fussnote-1-588264>

**Stiftung GRS Batterien (2020):** Altbatterien sicher -verpacken, lagern und transportieren - Der GRS-Sicherheitsstandard. Stiftung GRS Batterien, Hamburg [abgerufen am: 27.10.2022], verfügbar unter: [https://www.grs-batterien.de/fileadmin/Downloads/Sicherheit/GRS-Merkblatt\\_Sicherheitsstandard\\_V01\\_Feb2021.pdf](https://www.grs-batterien.de/fileadmin/Downloads/Sicherheit/GRS-Merkblatt_Sicherheitsstandard_V01_Feb2021.pdf)

**Stiftung GRS Batterien (2022):** Verpackung [online]. Stiftung Gemeinsames Rücknahmesystem Batterien [abgerufen am: 27.10.2022], verfügbar unter: <https://www.grs-batterien.de/sicherheit/sicherheitsforum/verpackung/#c2558>

**Strutzberg, L.; Lange, U. und Frerichs, T. (2022):** Rohstoffkritikalität und Kreislaufwirtschaft - Die Grenzen des Wachstums nutzen. In: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, 117 (7-8), S. 489-492. Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb [abgerufen am: 31.10.2022]. doi:10.1515/zwf-2022-1099

**Tao, J. und Yu, S. (2015):** Review on feasible recycling pathways and technologies of solar photovoltaic modules. In: Solar Energy Materials and Solar Cells, 141, S. 108-124. ISSN 09270248. doi:10.1016/j.solmat.2015.05.005

**Technische Hochschule Aschaffenburg (2022):** IRVE e-Waste Recycling [online]. Technische Hochschule Aschaffenburg [abgerufen am: 02.12.2022], verfügbar unter: <https://www.th-ab.de/transfer/projekte/irve-e-waste-recycling>

**The Battery Pass (15.11.2022):** Battery Pass [online], 15.11.2022 [abgerufen am: 21.02.2023], verfügbar unter: <https://thebatteryapp.eu/>

**Thews, M. (2022):** Start eines Recyclinglabels bereits in diesem Haushalt [online]. Michael Thews [abgerufen am: 02.11.2022], verfügbar unter: <https://www.michaelthews.de/2022/05/13/start-eines-recyclinglabels-bereits-in-diesem-haushalt/>

**U.S. Geological Survey (2020):** Mineral commodity summaries 2020. U.S. Geological Survey, Reston [abgerufen am: 27.10.2022], verfügbar unter: <https://pubs.er.usgs.gov/publication/mcs2020>

**Umicore Precious Metals Refining (2022):** Recyclables - E-scrap [online]. Umicore Precious Metals Refining [abgerufen am: 02.12.2022], verfügbar unter: <https://pmr.umicore.com/en/recyclables/e-scrap#tabs>

**Umwelt- und Energie Report (2022):** Recyclingmaterialien: ...eine „richtungsweisende Entscheidung für weitere Stoffströme!“ ? In: Umwelt- und Energie Report [abgerufen am: 27.10.2022], verfügbar unter: <https://www.umwelt-energie-report.de/2022/03/recyclingmaterialien-eine-richtungsweisende-entscheidung-fuer-weitere-stoffstroeme.html>

**Umweltbundesamt (2021):** Altbatterien [online]. Umweltbundesamt [abgerufen am: 31.10.2022], verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/ressourcen-abfall/verwertung-entsorgung-ausgewaehlter-abfallarten/altbatterien#im-jahr-2020-hat-deutschland-alle-von-der-eu-geforderten-mindestziele-erreicht>

**Umweltbundesamt (2022a):** „E-Waste Day“ ruft zur korrekten Entsorgung von Elektrogeräten auf [online]. Umweltbundesamt [abgerufen am: 08.12.2022], verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/presse/pressemitteilungen/e-waste-day-ruft-zur-korrekten-entsorgung-von>

**Umweltbundesamt (2022b):** Altauto, Altautoverwertung [online]. Umweltbundesamt [abgerufen am: 27.10.2022], verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/umwelttipps-fuer-den-alltag/mobilitaet/altauto-altauto-verwertung#hintergrund>

**Umweltbundesamt (2022c):** Elektro- und Elektronikaltgeräte [online]. Umweltbundesamt [abgerufen am: 28.10.2022], verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/ressourcen-abfall/verwertung-entsorgung-ausgewaehlter-abfallarten/elektro-elektronikaltgeraete>

**Umweltbundesamt (2022d):** Elektroaltgeräte [online]. Umweltbundesamt [abgerufen am: 02.12.2022], verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/abfall-ressourcen/produktverantwortung-in-der-abfallwirtschaft/elektroaltgeraete#elektronikaltgerate-in-deutschland>

**Vallero, C. (2022):** Hightech Recycling [online] – KfW Award Gründen. KfW [abgerufen am: 02.12.2022], verfügbar unter: <https://www.kfw.de/stories/wirtschaft/gruenden/luxchemtech/>

**VDI 2343 Blatt 4:2012-01:** Verein Deutscher Ingenieure e.V., Recycling elektrischer und elektronischer Geräte - Aufbereitung, Beuth Verlag GmbH, Berlin.

**VDI 4800 Blatt 2:2018-03:** Verein Deutscher Ingenieure e.V., Ressourceneffizienz - Bewertung des Rohstoffaufwandes, Beuth Verlag GmbH, Berlin.

**VDI e. V. (2022):** Circular Economy für Kunststoffe neu denken (White Paper), Verein Deutscher Ingenieure e.V.

**VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH (2018):** Kunststoffrecycling- Ressourceneffizienz durch optimierte Sortierverfahren. YouTube [abgerufen am: 03.11.2022], verfügbar unter: [https://www.youtube.com/watch?v=EvuNJ\\_yZi3g](https://www.youtube.com/watch?v=EvuNJ_yZi3g)

**VERE e.V. (2022):** Stellungnahme zur Initiative „Elektro- und Elektronik-Altgeräte - Bewertung der EU-Vorschriften“. Verband zur Rücknahme und Verwertung von Elektro- und Elektronik-Altgeräten e. V., Hamburg [abgerufen am: 08.12.2022], verfügbar unter: [https://ec.europa.eu/info/law/better-regulation/have-your-say/initiatives/13420-Elektro-und-Elektronik-Altgerate-Bewertung-der-EU-Vorschriften/F3353403\\_de](https://ec.europa.eu/info/law/better-regulation/have-your-say/initiatives/13420-Elektro-und-Elektronik-Altgerate-Bewertung-der-EU-Vorschriften/F3353403_de)

**Wirth, H. (2022):** Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland. Fraunhofer ISE [abgerufen am: 20.02.2023], verfügbar unter: <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/aktuelle-fakten-zur-photovoltaik-in-deutschland.pdf>

**Wolf, J.; Brüning, R.; Nellesen, L. und Schiemann, J. (2017):** Anforderungen an die Behandlung spezifischer Elektroaltgeräte unter Ressourcen- und Schadstoffaspekten. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau [abgerufen am: 31.10.2022], verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/anforderungen-an-die-behandlung-spezifischer>

**ZVEI - Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e. V. (2021):** Faktenblatt zu Recycling von Batterien. ZVEI - Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e. V., Frankfurt am Main [abgerufen am: 31.10.2022], verfügbar unter: [https://www.zvei.org/fileadmin/user\\_upload/Presse\\_und\\_Medien/Pressebereich/2021-051\\_Batteriemarkt\\_waechst\\_waehrend\\_der\\_Pandemie\\_stark/ZVEI\\_Faktenblatt\\_Recycling.pdf](https://www.zvei.org/fileadmin/user_upload/Presse_und_Medien/Pressebereich/2021-051_Batteriemarkt_waechst_waehrend_der_Pandemie_stark/ZVEI_Faktenblatt_Recycling.pdf)



VDI Zentrum Ressourceneffizienz (VDI ZRE)  
Bulowstraße 78  
10783 Berlin  
Tel. +49 30-2759506-0  
zre-info@vdi.de  
[www.ressource-deutschland.de](http://www.ressource-deutschland.de)

