

STUDIE ZUR CIRCULAR ECONOMY IM HINBLICK AUF DIE CHEMISCHE INDUSTRIE



Oberhausen, März 2017
© Fraunhofer UMSICHT

STUDIE ZUR CIRCULAR ECONOMY IM HINBLICK AUF DIE CHEMISCHE INDUSTRIE

**Vorgelegt
von:**

**Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits-
und Energietechnik UMSICHT**

Institutsleiter
Prof. Dr.-Ing. Eckhard Weidner
Osterfelder Straße 3
46047 Oberhausen

Für:

**Verband der Chemischen Industrie
e.V. (VCI)**

Landesverband NRW

Geschäftsführer
Hans-J. Mittelstaedt
Völklinger Str. 4
40219 Düsseldorf

Ein Beitrag zu

CHEMIE³
DIE NACHHALTIGKEITSINITIATIVE
DER DEUTSCHEN CHEMIE

Projektteam: Dr.-Ing. Markus Hiebel*, Jürgen Bertling, Jochen Nühlen, Dr.-Ing. Hartmut Pflaum, Annette Somborn-Schulz, Dr. Matthias Franke, Katharina Reh, Stephanie Kroop

**Projektleitung*

Zitierhinweis: Hiebel, M.; Bertling, J.; Nühlen, J.; Pflaum, H.; Somborn-Schulz, A.; Franke, M.; Reh, K.; Kroop, S.: Studie zur Circular Economy im Hinblick auf die chemische Industrie; Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT (Hrsg.), Studie im Auftrag des Verbands der Chemischen Industrie e.V., Landesverband NRW; Oberhausen, März 2017

In dieser Studie werden Namen von Unternehmen oder Namen von Produkten, Verfahren oder Dienstleistungen nur verwendet, um die Urheber- bzw. Herausgeberschaft von in der Studie zitierten und analysierten Informationsquellen und -bezügen eindeutig zuordnen zu können. Die Namensnennung stellt insbesondere keine Wertung, Rangliste oder sonstige Hervorhebung sowie keinerlei Empfehlung für das Angebotsspektrum eines bestimmten Unternehmens dar.

Oberhausen, März 2017

Inhalt

0	Vorwort	5
1	Zusammenfassung (Summary)	6
2	Zielstellung der Studie	15
3	Vorgehensweise, Recherche und Experteninterviews	16
3.1	Aufbau und Struktur der Studie	16
3.2	Vorgehen	16
3.3	Experteninterviews	17
3.3.1	Auswahl der Experten	17
3.3.2	Leitfragen für die Experten	17
3.4	Auswertungsmethode	18
4	Zirkuläre Wirtschaft (Circular Economy)	19
4.1	Das Konzept der Circular Economy – Entstehung, Rezeption, Definitionen	19
4.2	Definition der Circular Economy für diese Studie	22
4.3	Modell für eine Circular Economy	23
5	Analyse und Einfluss der Circular Economy für Altreifen	26
5.1	Erfassung der aktuellen Lage	26
5.1.1	Herstellung, Design, Zusammensetzung und Funktion	26
5.1.2	Rechtliche und nutzerseitige Anforderungen an die Produktperformance	29
5.1.3	Produktions- und Abfallmengen	30
5.1.4	Aktuelle Zielvorgaben für die Verwertung	32
5.1.5	Verwertungswege und ihre Sekundärprodukte	33
5.1.6	Stoffflüsse und Akteurskonstellationen	36
5.1.7	Umweltwirkungen	38
5.1.8	Relevanz für Wirtschaft und Beschäftigung	40
5.2	Potenziale einer Circular Economy für Altreifen	41
5.2.1	Technologische, ökonomische und ökologische Grenzen der Circular Economy	41
5.2.2	Innovationspotenziale und Geschäftsmodelle der Circular Economy	43
5.2.3	Politische und regulatorische Hemmnisse für die Circular Economy	44
5.2.4	Notwendige Rahmenbedingungen und Impulse zur Umsetzung der Circular Economy	45
5.3	Zusammenfassung Stoffstrom Altreifen	46

6	Analyse und Einfluss der Circular Economy für Rotorblätter von Windenergieanlagen	47
6.1	Erfassung der aktuellen Lage	47
6.1.1	Herstellung, Design, Zusammensetzung und Funktion	50
6.1.2	Rechtliche und nutzerseitige Anforderungen an die Produktperformance	53
6.1.3	Produktions- und Abfallmengen	53
6.1.4	Aktuelle Zielvorgaben für die Verwertung	56
6.1.5	Verwertungswege und ihre Sekundärprodukte	56
6.1.6	Stoffflüsse und Akteurskonstellationen	61
6.1.7	Umweltwirkungen	64
6.1.8	Relevanz für Wirtschaft und Beschäftigung	65
6.2	Potenziale einer Circular Economy für Rotorblätter	66
6.2.1	Technologische, ökonomische und ökologische Grenzen der Circular Economy	66
6.2.2	Innovationspotenziale und Geschäftsmodelle der Circular Economy	68
6.2.3	Politische und regulatorische Hemmnisse für die Circular Economy	69
6.2.4	Notwendige Rahmenbedingungen und Impulse zur Umsetzung der Circular Economy	71
6.3	Zusammenfassung Stoffstrom Rotorblätter	71
7	Analyse und Einfluss der Circular Economy in Bezug auf LCD-Computerbildschirme	73
7.1	Erfassung der aktuellen Lage	73
7.1.1	Herstellung, Design, Zusammensetzung und Funktion	73
7.1.2	Rechtliche und nutzerseitige Anforderungen an die Produktperformance	77
7.1.3	Produktions- und Abfallmengen	78
7.1.4	Aktuelle Zielvorgaben für die Verwertung	79
7.1.5	Verwertungswege und ihre Sekundärprodukte	79
7.1.6	Stoffflüsse und Akteurskonstellationen	82
7.1.7	Umweltwirkungen	84
7.1.8	Relevanz für Wirtschaft und Beschäftigung	86
7.2	Potenziale einer Circular Economy für LCD-Computerbildschirme	88
7.2.1	Technologische, ökonomische und ökologische Grenzen der Circular Economy	88
7.2.2	Innovationspotenziale und Geschäftsmodelle der Circular Economy	90
7.2.3	Politische und regulatorische Hemmnisse für die Circular Economy	91
7.2.4	Notwendige Rahmenbedingungen und Impulse zur Umsetzung der Circular Economy	91
7.3	Zusammenfassung Stoffstrom LCD-Computerbildschirme	92

8	Einfluss des EU-Kreislaufwirtschaftspakets auf die Circular Economy	93
8.1	Definitionen Begrifflichkeiten	93
8.2	Forderungen und Entwicklungen	94
8.2.1	Produktion und Produktgestaltung	94
8.2.2	Verbrauch	95
8.2.3	Abfallbewirtschaftung	95
8.2.4	Sekundärrohstoffe	97
8.2.5	Kunststoffe und Kunststoffabfälle	98
8.2.6	Kritische Rohstoffe	98
8.2.7	Bau- und Abbruchabfälle	98
8.2.8	Biomasse und biobasierte Produkte	99
8.2.9	Innovation und Investition	99
8.2.10	Überwachung der Fortschritte	99
8.3	Positionen unterschiedlicher Stakeholder zum Kreislaufwirtschaftspaket	100
9	Strategische Diskussion zu einer Circular Economy	101
9.1	Zur Notwendigkeit einer Circular Economy	101
9.2	Die Argumente für eine Circular Economy	102
9.3	Ein systemischer Blick auf die Circular Economy und grundsätzliche Zielkonflikte	104
9.4	Status bei der Transformation zu einer Circular Economy	107
9.5	Detaillierte Betrachtung der Hemmnisse und Zielkonflikte bei der Umsetzung der Circular Economy	112
9.5.1	Eignung der ausgewählten Stoffströme für verallgemeinernde Schlussfolgerungen	112
9.5.2	Technologische, ökonomische und ökologische Herausforderungen und Grenzen	114
9.6	Impulse für eine Circular Economy	120
9.6.1	Innovationsbedarf und neue Geschäftsmodelle für die Circular Economy	120
9.6.2	Politische und regulatorische Treiber für die Circular Economy	121
9.7	Der Transformationsprozess zur Circular Economy	123
9.8	Die Circular Economy – eine Zukunftsoption für Nordrhein-Westfalen?	131
10	Anhänge	133
10.1	Positionen der Stakeholder zum Kreislaufwirtschaftspaket (Stand September 2016)	133
10.2	Anforderungen CE-Kennzeichnung für Computerbildschirme	138
11	Glossar	140
12	Abkürzungsverzeichnis	149

13	Tabellenverzeichnis	151
14	Bildverzeichnis	152
15	Quellenverzeichnis	155

0 Vorwort

Diese Studie wurde im Auftrag des Verbands der Chemischen Industrie e.V., Landesverband NRW im Zeitraum Juni bis Dezember 2016 erstellt. Zwischenergebnisse wurden regelmäßig im Industriebegleitkreis aus Mitgliedsunternehmen des VCI NRW diskutiert.

Darüber hinaus wurde die Studie von einem Beirat mit Vertretern aus dem Landtag NRW (Mitglieder der Enquête-Kommission Chemie) und aus folgenden Ministerien und Einrichtungen unterstützt:

- Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (MKULNV)
- Ministerium für Innovation, Wissenschaft und Forschung des Landes Nordrhein-Westfalen (MIWF)
- Ministerium für Wirtschaft, Energie, Industrie, Mittelstand und Handwerk des Landes Nordrhein-Westfalen (MWEIMH)
- Clustermanagement CHEMIE.NRW
- N³ Nachhaltigkeitsberatung Dr. Friege & Partner

Mit dem Beirat fanden zwei Treffen statt.

Zur Absicherung der Ergebnisse und zur Erweiterung des Stands des Wissens wurden zusätzlich für die drei Stoffströme Altreifen, Rotorblätter und LCD-Bildschirme Experteninterviews durchgeführt, um die Herstellersicht, die Recyclersicht und eine mehr wissenschaftliche Sicht einzubinden.

Das Team von Fraunhofer UMSICHT bedankt sich bei allen Mitarbeitenden der Geschäftsstelle des VCI NRW, beim Industriebegleitkreis und beim Beirat für das konstruktive Feedback und den regen Ideenaustausch.

Unser Dank geht ebenfalls an die Experten, die uns mit ihrer Fachkenntnis unterstützt haben. Die Erkenntnisse sind in diese Studie eingeflossen – die Studie muss aber nicht zwingend die Meinung der Experten wiedergeben, sondern berücksichtigt unterschiedliche Informationsquellen und methodische Ansätze.

Oberhausen, März 2017



Prof. Dr.-Ing. Eckhard Weidner
Institutsleiter



Dr.-Ing. Markus Hiebel
Projektleiter

1 Zusammenfassung (Summary)

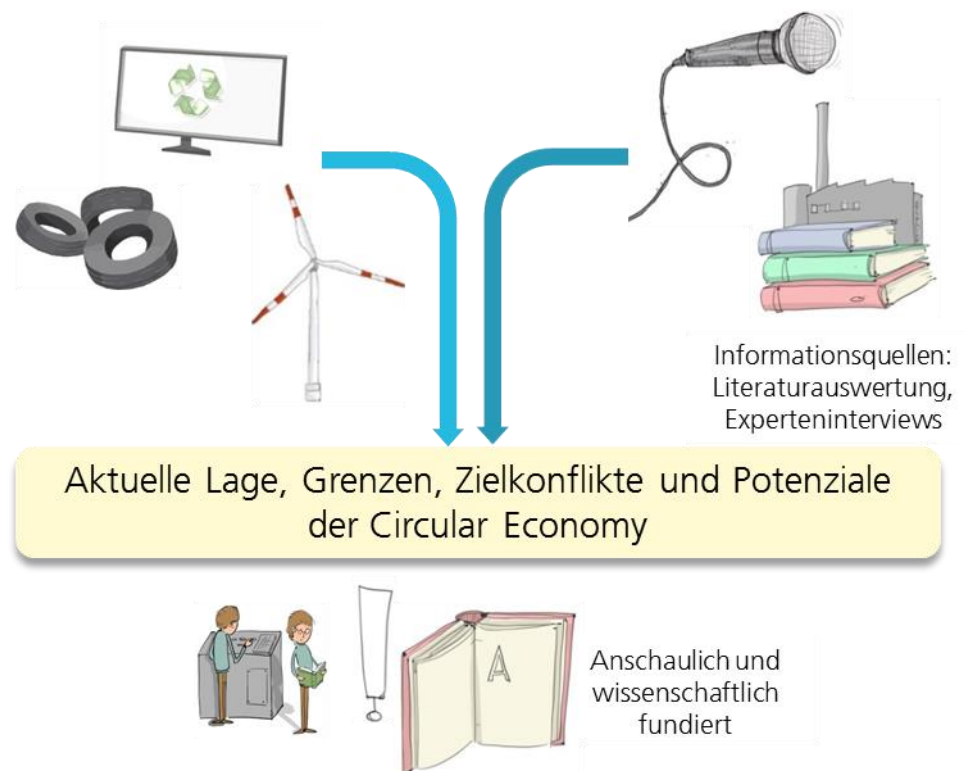
Zielstellung der Studie
| Kapitel 2

Der Verband der Chemischen Industrie e.V., Landesverband NRW hat das Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT beauftragt, eine Studie zur Circular Economy (zirkulären Wirtschaft) zu erstellen. Im Rahmen der Studie wurden Chancen, aber auch Grenzen der Circular Economy im Hinblick auf die chemische Industrie herausgearbeitet.

Vorgehensweise |
Kapitel 3

Basis der Arbeiten stellt eine umfangreiche wissenschaftliche Literaturrecherche dar. Bereits vorhandenes institutseigenes Know-how ging mit in die Darstellung ein. Aus den zusammengestellten Informationen wurden anschließend Leitfragen herausgearbeitet, die in Experteninterviews diskutiert wurden, um so Drittexpertise mit in das Projekt einzubeziehen. Die Interviews wurden insbesondere dafür genutzt, identifizierte Wissenslücken in der Literatur zu schließen und um Erkenntnisse der Studie durch die Experten zu untermauern. So wurde eine fundierte Aufstellung über die Grenzen und die Potenziale der Circular Economy sichergestellt.

Bild 1-1:
Vorgehen in der Studie



Definition der Circular
Economy für diese
Studie | Kapitel 4

Unter Berücksichtigung der Entwicklung des Konzepts der Circular Economy hat Fraunhofer UMSICHT für diese Studie folgende Definition entwickelt und verwendet:

Verwendete Definition der Circular Economy von Fraunhofer UMSICHT

»In einer Circular Economy verbleiben die eingesetzten Stoffe über den Lebenszyklus von Waren hinaus in einem Stoffkreislauf. Abfälle, Emissionen, dissipative Verluste und damit auch die Entnahme von Rohstoffen aus der Umwelt sollen dabei soweit möglich verringert werden.

Wichtige Elemente zur Umsetzung einer Circular Economy sind die Wieder- und Weiterverwendung von Waren, das Recycling von Materialien und Stoffen sowie eine Gestaltung der Waren, die eine Kreislaufführung ohne Verluste in der Qualität ermöglicht. Gleichzeitig muss eine Anreicherung von Stoffen, die eine Kreislaufführung erschweren und die Akkumulation von Schadstoffen vermieden werden. Dabei soll die Nutzungsdauer von Waren möglichst lang und ihre Rückführung in den Kreislauf zum Ende der Nutzungsdauer möglichst schnell sein.

Eine Nebenbedingung, die die Qualität einer Circular Economy wesentlich mitbestimmt, ist ein möglichst geringer Energiebedarf – der idealerweise aus erneuerbaren Ressourcen gedeckt wird – zur Aufrechterhaltung des Kreislaufs. Stoffe, die nicht im Kreis geführt werden können, sollten einer energetischen Verwertung zugeführt werden.

Materialien, bei denen sich dissipative Verluste nicht vermeiden lassen, sollten abbaubar sein.

Das Konzept der Circular Economy kann auf Regionen, Branchen, Unternehmen oder einzelne Waren gleichermaßen angewandt werden.«

Betrachtete Stoffströme

Um Potenziale und Grenzen der Circular Economy anschaulich darzustellen, wurden drei Stoffströme detailliert untersucht: Reifen, Rotorblätter aus Windkraftanlagen und LCD-Bildschirme.

Grenzen und Potenziale für Reifen | Kapitel 5

Reifen sind ein komplexes Verbundbauteil, dessen werkstoffliches Recycling durch Vielfalt und Haftung der Komponenten und vor allem durch die irreversible Vernetzung des Matrixmaterials Gummi erschwert wird. Die heutige stoffliche Verwertung von Altreifen ist daher durch eine Kaskadennutzung geprägt, bei der zahlreiche Sekundärprodukte entstehen wie elastifizierter Asphalt, Fallschuttmatten, Einstreuerganulate für Kunstrasen etc. In Bezug auf Bruttowertschöpfung und Beschäftigungszahlen erreicht der Sekundärmarkt für altreifenbasierte Produkte zum heutigen Stand ca. 1/6 des Primärmarktes.

Zur Steigerung der Zirkularität wären vor allem die beiden folgenden Ansätze zielführend:

1. Deutliche Steigerung des »recycled content« durch den Einsatz von Sekundärrohstoffen oder Karkassen (oder anderen Elementen des Reifens) in der Neuproduktion von Reifen.
2. Intensivierung der Forschung und Entwicklung zu neuen Konzepten für die Runderneuerung und Devulkanisation von Gummi (inkl. der Entwicklung neuer Reifenwerkstoffe, die sich reversibel vernetzen lassen) sowie zur Schadstoffentfrachtung (z. B. polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe, Schwermetalle) von Reifen.

Eine Anhebung der End-of-Life (EoL)-Recyclingraten hingegen wäre gerade bei einem Material wie Gummi, dessen Herstellungsprozess sich weder einfach umkehren noch wiederholen lässt, nicht zielführend, sondern würde zur »Erfindung« neuer Sekundäranwendungen führen. Man kann aber davon ausge-

hen, dass vieles von dem, was aus heutiger Sicht mit Altreifen und insbesondere Gummigranulat wirtschaftlich sinnvoll gemacht werden kann, bereits geschieht. Ansonsten würden die Anteile der energetischen Verwertung deutlich schneller schrumpfen, als sie es zurzeit tun.

Grenzen und Potenziale für Rotorblätter von Windenergieanlagen | Kapitel 6

Rotorblätter für Windenergieanlagen bestehen zu unterschiedlichen Anteilen aus Harzen, Balsaholz, Glas- oder Carbonfasern, Hartschaum, Eisen- und Nicht-eisenmetallen und Lacken). Die Rotorblätter sind wichtige Elemente der Energiewende: Sie müssen bei geringem Gewicht hohe werkstoffliche Anforderungen erfüllen und ermöglichen damit große Rotordurchmesser. Nach dem Ende ihrer Nutzungsdauer sollten die Rotorblätter möglichst hochwertig verwertet werden. Einige der Altanlagen werden heute komplett rückgebaut und an anderen Standorten wieder montiert und weiterbetrieben. Dieser Pfad wird aufgrund eines Sättigungseffekts in Zukunft schwieriger. Weitere Restriktionen sind die steigenden Größen der Anlagen und damit die steigenden Logistikkosten und die Abnahme von geeigneten Anlagenstandorten. Aus Sicht der Circular Economy ist der Weiterbetrieb von Anlagen über einen Zeitraum von 20 Jahren hinaus unter Einhaltung aller Sicherheitsrichtlinien ein denkbarer Ansatz, solange noch keine zufriedenstellenden stofflichen Verwertungswege existieren und ein Weiterbetrieb den Ausbauzielen des Erneuerbare-Energien-Gesetzes nicht im Wege steht.

Zurzeit werden Rotorblätter aus Altanlagen häufig gelagert, da geeignete hochwertige Verwertungswege fehlen. Die Nutzung der zerkleinerten Rotorblätter (mit allen Problemen des Arbeitsschutzes bei der Zerkleinerung) im Zementwerk ist eine Möglichkeit, den Energiegehalt der Rotorblätter zu nutzen und die Grundbestandteile der Glasfasern in den Zement einzubinden.

Das hochwertige Recycling von Rotorblättern, die Wiedernutzung der identischen Glasfasern in neuen Rotorblättern, ist technisch zur Zeit nicht realisierbar. Es fehlen aber auch Anwendungen für die Wiedernutzung. Potenzielle Anwendungsmöglichkeiten wären die Nutzung von Glasfasermehl als Substitut für Primärmaterial (»Glasfaser zu Glas«) oder der Einsatz »Glasfaser zu Füllstoff« in der Bauchemie und der Kunststoffindustrie.

Die Forschung zum zirkulären Design, zu geeigneten Recyclingverfahren und alternativen Materialien zur Substitution der glasfaserverstärkten Kunststoffe der Rotorblätter muss jedoch weitergeführt werden. Dabei ist auf mögliche Zielkonflikte hinsichtlich Energieausbeute im Anlagenbetrieb und Recyclingfähigkeit zu achten. Es muss darauf geachtet werden, dass weiterhin große Rotordurchmesser realisierbar sein müssen.

Grenzen und Potenziale für LCD-Bildschirmgeräte | Kapitel 7

Bei Flachbildschirmen handelt es sich um komplex aufgebaute Produkte, die einen hohen Wertstoff- aber teilweise auch relevanten Schadstoffgehalt aufweisen. In der Erstbehandlung der Geräte, deren Ausgestaltung stark von der Notwendigkeit zur Schadstoffentfrachtung bestimmt ist, wird eine Vielzahl an für ein hochwertiges Recycling geeigneter Fraktionen wie Eisen- und Aluminiummetalle oder Leiterplatten erzeugt. Für die Kunststofffraktion ist ein Recycling durch die Belastung mit Flammenschutzmitteln nur für einen Teilstrom sinnvoll. Enthaltene strategisch wichtige Metalle, bei LCD-Bildschirmen besonders Indium, werden aufgrund fehlender Verwertungsstrukturen und ökonomischer Anreize derzeit nicht zurückgewonnen. Indium wird neben LCD-Bildschirmen

auch in Legierungen und Loten, Photovoltaik-Modulen sowie Leucht- und Laserdioden eingesetzt [Christman-2014], [EC-2016], und ist daher als Rohstoff für die europäische Industrie relevant, auch wenn in der EU keine Produktionsstandorte für LCD-Computerbildschirme angesiedelt sind.

Auch bezüglich der Vorbereitung zur Wiederverwendung bestehen relevante Hemmnisse, beispielsweise durch die Beschädigung bei der Erfassung oder Ersatzteilmangel. Durch Maßnahmen wie ein recyclingfreundlicheres Produktdesign und eine verbesserte Produktkennzeichnung könnten bestehende Hemmnisse abgebaut und die Circular Economy für LCD-Computerbildschirme weiterentwickelt werden.

Übersicht und Übertragbarkeit der drei Stoffströme | Kapitel 9.5.1

Die drei Stoffströme wurden in der folgenden Tabelle zueinander in Bezug gesetzt.

Tabelle 1-1: Betrachtete Produkte/Stoffströme

Merkmal	Fahrzeugreifen	Rotorblätter von Windenergieanlagen	LCD-Bildschirme
Aufbau, Zusammensetzung	Komplexer Materialverbund	Eher einfacher Materialverbund	Komplexes Produkt aus vielen verschiedenen Komponenten und Materialien
Umlaufzeit/ Lebensdauer	Bis zu 8 Jahre, bestimmt von der Restprofiltiefe	I.d.R. nach 20 Jahren; je nach anlagenspezifischer Situation auch 15 – 25 Jahre; bestimmt von Materialermüdung oder Maßnahmen zur Effizienzsteigerung (Repowering)	Ca. 6,6 Jahre (Erst- und Zweitnutzung) [Buchert-2012]; bestimmt von Moden und Trends
Anfallstellen und Logistik	Deutschlandweite kostenpflichtige Abgabe in Werkstätten und auf Recyclinghöfen	Ungeregelt, zeitlich- und räumlich stark schwankend; an Standorten der WEA; generell deutschlandweit, aktuell Schwerpunkt Norden	Erfassung durch öffentlich-rechtliche Entsorgungsträger und den Handel (gesetzlich im ElektroG geregelt) [ElektroG-2015]
Anfallmengen in Deutschland pro Jahr	568 000 t/a (2015)	Durchschnittlich 3 000 t/a zwischen 2012 und 2016	Ca. 17 000 t/a, 3 Millionen Stück. (2013), Schätzung nach [Sellin-2016] und [Elektrocycling-2015]
Stand der Zirkularität	Kaskadennutzung und Sekundäranwendungen sind etabliert	Recyclingverfahren zur Trennung von Glasfaserverbundwerkstoffen nicht existent; energetisch-stoffliche Verwertung in Zementwerken	Recycling für Massen- und Edelmetalle sowie ausgewählte Kunststoffe; Recycling kritischer Metalle nicht wirtschaftlich (z. B. für Indium)
Potenzielle Zielkonflikte (Trade-offs)	Fahrsicherheit, Kraftstoffverbrauch,	Weiterbetrieb; Export von Altanlagen ins Ausland;	Geheimhaltungsbedarf der Hersteller bzgl.

Merkmal	Fahrzeugreifen	Rotorblätter von Windenergieanlagen	LCD-Bildschirme
offs)	Lärmemission	mögliche Performanceverluste durch andere Rotorblattmaterialien	Aufbau und Zusammensetzung im globalen Wettbewerb; Produktsicherheit
Übertragbarkeit auf andere Stoffströme	Elastomerprodukte wie Dichtungen, Schwingungsdämpfer; Silikonprodukte für die Küche, elastische und geschäumte Polyurethanbauteile	Klassische glasfaserverstärkte Kunststoff (GFK)-Anwendungen wie Boote, Carports, Wohnwagen, Spielgeräte, andere carbonfaserverstärkte Werkstoffe wie CFK im Flugzeug- und Fahrzeugbau	Andere Elektro- und Elektronikgeräte bzw. -bauteile

Mögliche Trade-offs
Zielkonflikte |
Kapitel 9.5.1

Bei der Optimierung des Gesamtsystems müssen alle Lebenszyklusphasen berücksichtigt werden, da das Optimum einer einzelnen Phase nicht das Gesamtoptimum für ein Produkt sein muss. Bei vielen Optimierungen müssen Trade-offs (Zielkonflikte) betrachtet werden, d. h. dass durch wechselseitige Abhängigkeiten häufig gegenläufige Effekte in Bezug auf ein gegebenes Zielsystem entstehen: Wird z. B. eine Produkteigenschaft optimiert, kann zugleich eine andere schlechter werden.

Konkrete Beispiele für Trade-offs (siehe Tabelle 1-1) sind bei Reifen ein möglicherweise höherer Kraftstoffverbrauch, verminderte Haftungseigenschaften oder erhöhte Lärmemissionen durch den Einsatz recyclingfreundlicherer Materialien. Bei Rotorblättern könnte die Substitution von GFK durch Metallbleche oder Holz zu Performanceverlusten hinsichtlich geringerer Windausbeuten der Anlagen in der (für die Energiewende entscheidenden) Nutzungsphase führen. Diese theoretisch möglichen Materialalternativen wären zwar in gut etablierten Verwertungsverfahren rezyklierbar, würden jedoch nach aktuellem Kenntnisstand nicht die gleichen Rotorblattlängen bei identischen Materialkennwerten erreichen. Bei LCD-Bildschirmen steht beispielsweise der Geheimhaltungsbedarf der Hersteller bezüglich Aufbau und Zusammensetzung im globalen Wettbewerb dem Informationsbedarf entgegen, der für die Entwicklung und vor allem großtechnische Implementierung von innovativen Recyclingverfahren erforderlich wäre. Dies gilt insbesondere für den Aufbau von Recyclingverfahren für nur in geringen Konzentrationen in den Altgeräten vorhandene, kritische Metalle. Ein weiterer Zielkonflikt kann im Bereich der Produktsicherheit bestehen. So ist es beispielsweise erforderlich, in bestimmten Bauteilen flammgeschützte Kunststoffe zu verwenden. Dies steht, je nach Art der für den Flammenschutz eingesetzten Substanzen, zum Teil der Recyclbarkeit dieser Bildschirmbestandteile entgegen. Der Einsatz anderer Materialien muss sorgfältig auf Performance, Umweltfreundlichkeit und Kosten geprüft werden.

Bei allen Entscheidungen zur Circular Economy sollten daher alle Lebenszyklusphasen berücksichtigt werden, um unerwünschte Trade-offs zu erkennen und soweit wie möglich zu vermeiden.

EU-Kreislaufwirtschaftspaket und Circular Economy |
Kapitel 8

Kapitel 8 beschreibt Forderungen und Entwicklungen, die sich aus dem EU-Kreislaufwirtschaftspaket für die Circular Economy ergeben können in Bezug auf Produktion und Produktgestaltung, Verbrauch, Abfallbewirtschaftung, Se-

kundärrohstoffe, Kunststoffe und Kunststoffabfälle, kritische Rohstoffe, Bau- und Abbruchabfälle, Biomasse und biobasierte Produkte und Innovation und Investition. Diese möglichen Treiber einer Circular Economy werden in Kapitel 9.6.2 wieder aufgegriffen. Eine Folge könnte z. B. sein, dass dem Verbraucher produktbezogene Umweltinformationen zur Verfügung gestellt werden, damit er diese sowohl bei der Kaufentscheidung als auch während der Nutzungsphase berücksichtigen kann (z. B. Reparierbarkeit, recycled content). Ziel ist es dabei, langlebige, kreislauffähige und innovationsoffene Produkte im Markt zu etablieren.

Notwendigkeit und Argumente für eine Circular Economy | Kapitel 9.1 und 9.2

In Kapitel 9.1 wird das Konzept der Circular Economy unter Berücksichtigung unterschiedlicher Perspektiven eingeordnet. Wenn die Circular Economy als langfristiges Ziel wünschenswert ist, so muss daher der Pfad zu ihrer Umsetzung über wettbewerbsfähige Zwischenschritte erfolgen, wenn man eben dieses Ziel nicht gefährden will. Für die Circular Economy können unterschiedliche Argumente sprechen, wie die Wertschöpfung durch Recycling, die Ressourcenverknappung, die Reduzierung von Flächenkonkurrenzen und die Emissionsminderung, die Versorgungssicherheit und die Minderung struktureller Risiken bei der Rohstoffversorgung. Alle Argumente werden in Kapitel 9.2 kritisch hinterfragt.

Systemischer Blick und mögliche Zielkonflikte einer Circular Economy | Kapitel 9.3

In Kapitel 9.3 wird ein systemischer Blick auf die Circular Economy geworfen und grundsätzliche Zielkonflikte werden diskutiert. Im Resultat lassen sich sieben Punkte als zentrale Herausforderungen für die Umsetzung einer zirkulären Ökonomie zusammenfassen:

Zentrale Herausforderungen für die Transformation zu einer Circular Economy

- 1) Eine Schlüsselrolle für die Umsetzung einer Circular Economy spielt die Entwicklung von kreislauffähigen Produkten. Ihre Durchsetzung erfordert es, dass sie gegenüber nicht kreislauffähigen Produkten wettbewerbsfähig sind. Die Wettbewerbsfähigkeit muss dabei insbesondere auch die Effizienz und Performance der Produkte bei Herstellung und Nutzung in den Blick nehmen.
- 2) Der zirkuläre Anteil in der Warenproduktion (recycled content) in Form von reparierten oder überholten Produkten, wiederverwerteten Komponenten und rezyklierten Werk- und Rohstoffen muss gesteigert werden. Gleichzeitig müssen als Grundvoraussetzung die Produktsicherheit und Umweltstandards gewährleistet werden.
- 3) Allgemein müssen bestehende Vorgehen zum Produkt- und Abfallmanagement berücksichtigt werden. Sortier-, Trenn- und Aufbereitungstechnologien inklusive Systemen zur lebenszyklusweiten Logistik und Materialidentifikation müssen weiterentwickelt werden. Dabei spielt eine enge Abstimmung mit der Entwicklung kreislauffähiger Produkte eine wichtige Rolle.
- 4) Der teilweise sehr große zeitliche Unterschied zwischen Rohstoffbedarf und Verfügbarkeit der Sekundärrohstoffe und die damit verbundenen Mengen-, Qualitäts- und Akzeptanzprobleme erfordern neue Methoden zur Prognose und langfristigen Rohstoffstrategie.
- 5) Die Materialverluste bei dissipativen und umweltoffenen Anwendungen¹ müssen vermindert werden. Materialien, deren Verluste unvermeidbar sind oder deren Verlust intendiert ist, sollten eine ausreichend schnelle Abbaubarkeit besitzen.
- 6) Rohstoffbedarfe, die durch eine Kreislaufführung nicht gedeckt werden können oder die zur Deckung des Energiebedarfs einer Circular Economy erforderlich sind, müssen zunehmend aus regenerativen Quellen nachhaltig gewonnen werden (Flächenkonkurrenzen zur Nahrungsmittelproduktion müssen berücksichtigt werden).

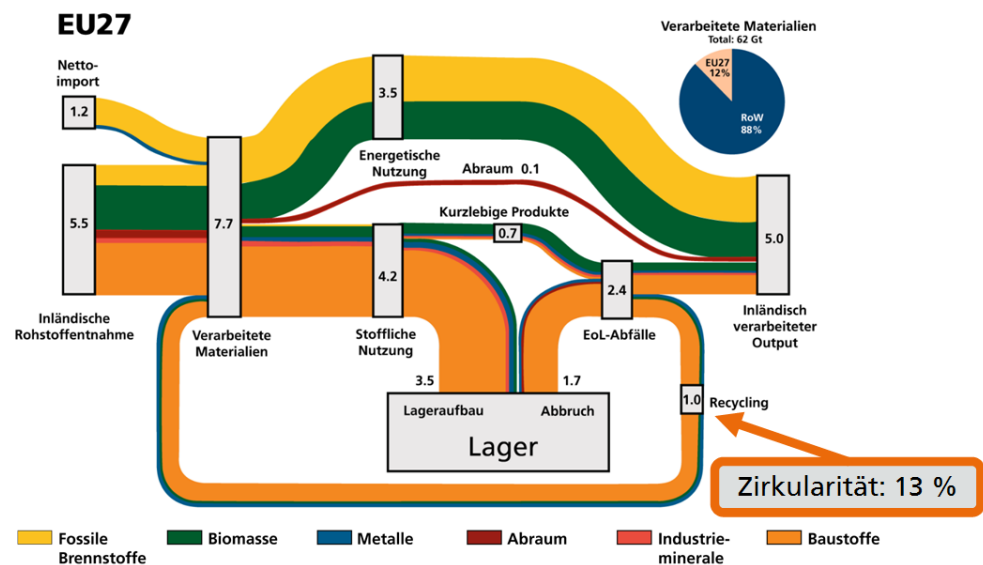
¹ Dies sind z. B. Materialien, die in der Umwelt verbleiben sollen, wie Pflanzentöpfe oder Bodengitter.

- 7) Eine Circular Economy und ihre Ausgestaltung dürfen anderen wichtigen gesellschaftlichen Zielen wie der Bewältigung des Klimawandels, der Energiewende oder der Verringerung von Armut nicht entgegenwirken.

Status der Transformation zu einer Circular Economy | Kapitel 9.4

In Kapitel 9.4 wird der Status der Transformation zu einer Circular Economy beschrieben und dieser ist ernüchternd. Bezogen auf die gesamte eingesetzte Materialmenge von 62 Milliarden Tonnen beträgt der Recyclinganteil weltweit ca. 6,5 % und in der EU-27 13 % (vgl. Bild 1-2) [Haas-2015]. Dies ist zugleich das Maß der *Zirkularität* der weltweiten Wirtschaft bzw. der EU. Die Zirkularität in Deutschland beträgt nach diesem Modell im Jahr 2014 überschlagsmäßig 17 %; bezieht man die nicht verwertete inländische Entnahme mit ein nur 7,6 % (Daten aus [DESTATIS-2016]).

Bild 1-2:
Materialflüsse und Zirkularität in der EU im Jahr 2005 – alle Werte in Milliarden Tonnen, nach [Haas-2015]



Als Fazit gilt damit, dass nur ein kleiner Teil des *insgesamt* verarbeiteten Materials aktuell im Kreis geführt wird. Weder die Welt, noch die EU, noch Deutschland befinden sich in Sichtweite einer realisierten Circular Economy, wenn man *alle* eingesetzten Materialien als Bezugsgröße wählt. Etwa 45 % dieser Materialien werden heute für die energetische Nutzung verwendet und sind damit nicht zirkulär. Der zunehmende Verzicht auf fossile Energieträger im Energiesystem verbunden mit dem gesteigerten Einsatz von erneuerbaren Energien (z. B. nach dem Vorbild der deutschen Energiewende) würde daher die Zirkularität auch ohne stoffliches Recycling deutlich steigern helfen. Für die Transformation hin zu einer Circular Economy ist Recycling ein zusätzlicher Baustein, wenn es wirtschaftlich, ökologisch und wettbewerbsgerecht erfolgen kann. Recycling wird es aber nicht allein richten können, weil erstens der Materialverbrauch an fossilen Energieträgern nach wie vor sehr groß ist und zweitens die globalen Materialbestände in langlebigen Produkten und Gebäuden stetig und schnell ansteigen (und dieses Material erst zeitverzögert zurückgewonnen werden kann). Der Zugriff auf Materialbestände (anthropogene Lager) kann nur erfolgen, wenn zum einen zu jedem Zeitpunkt genügend Informationen über den verbauten Materialmix und die zugehörigen Materialmengen vorhanden sind und zum anderen Weiterverwendungsfähigkeit, Modularisierung, Komponentenertüchtigung, ein recyclingfreundliches Design und eine ökonomische Recyclingtechnologie zusammenkommen.

Hemmnisse bei der Umsetzung einer Circular Economy | Kapitel 9.5

In Kapitel 9.5 werden technologische, ökonomische und ökologische Herausforderungen und Grenzen diskutiert, um von einer »Linear Economy« zu einer Circular Economy zu gelangen (siehe Bild 1-3). Technische Herausforderungen liegen z. B. in der Produktgestaltung oder in dissipativen Verlusten. Ökologische Herausforderungen sind z. B. die spezifischen Energie- und Rohstoffbedarfe des Recyclings oder auch kritische Emissionen. Ökonomische Herausforderungen sind u. a. die Preise von Sekundärrohstoffen im Vergleich zu Primärrohstoffen und der Umgang mit Kuppelprodukten.

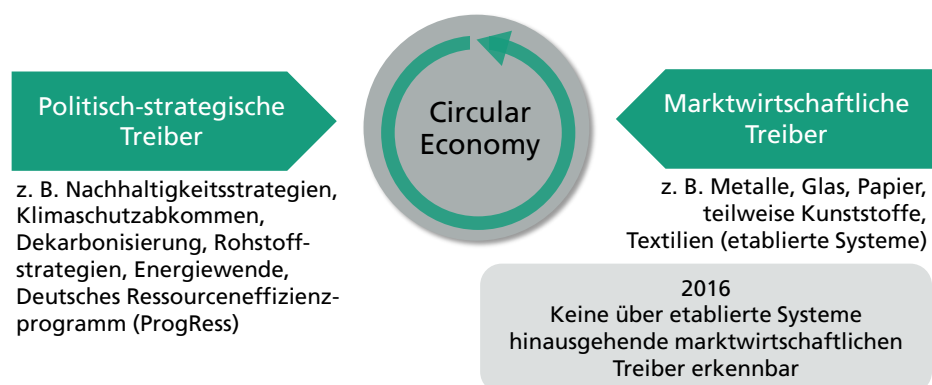
Bild 1-3:
Grenzen und Herausforderungen einer Circular Economy, eigene Darstellung



Strategische Diskussion zu einer Circular Economy – Impulse | Kapitel 9.6

In Kapitel 9.6 wird der Innovationsbedarf für neue Geschäftsmodelle für die Circular Economy beschrieben. Es werden die Rollen der unterschiedlichen Akteure (Staat, Wirtschaft, Gesellschaft und Wissenschaft) beleuchtet. Einige Treiber sind im folgenden Bild dargestellt.

Bild 1-4:
Treiber für die Transformation zu einer Circular Economy, eigene Darstellung

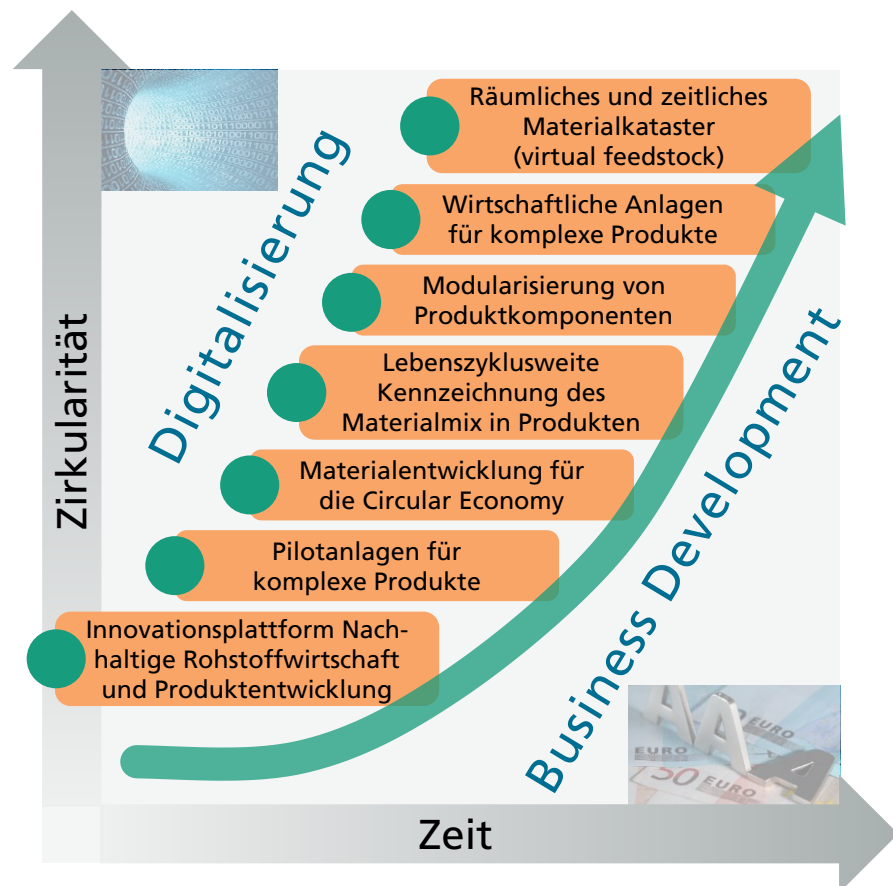


Transformationsprozess zur Circular Economy | Kapitel 9.7

In Kapitel 9.7 wird der Transformationsprozess zur Circular Economy diskutiert. Die folgende Grafik fasst einen Weg zu einer Circular Economy zusammen und wird von der Digitalisierung und intelligenten Geschäftsmodellen eingerahmt. Um eine Circular Economy umzusetzen, ist es wichtig, den Austausch und die Synergien zwischen Akteuren zu verbessern (Idee der Innovationsplattform). Weiter sind öffentlich oder über öffentlich-private Partnerschaften finanzierte

Pilot-/Demonstrationsanlagen für heute nicht (wirtschaftlich) recycelbare Stoffströme wichtig, um Kompetenzen und Wissen zu erwerben. Forschungsprogramme für Material- und Produktentwicklung sowie Kriterien zur Messung von Zirkularität sind relevant, um Erfolge zu messen und um den Informations-transfer zwischen Produktion und Verwertung zu gewährleisten. Hierzu gehört auch die lebenszyklusweite Kennzeichnung. Das Produktdesign kann zur Circular Economy durch eine Modularisierung von Produktkomponenten (Austausch, Reparierbarkeit, Refurbishment) beitragen. Schlussendlich ist der Aufbau eines digitalen, zeitlichen und räumlichen Katasters des Inhalts von langlebigen Produkten wichtig, um durch die Digitalisierung der Circular Economy neue Geschäftsmodelle zu realisieren.

Bild 1-5:
Maßnahmen zur Steigerung der Zirkularität von Industrieländern, eigene Darstellung



Circular Economy als Zukunftsoption für NRW?

In Kapitel 9.8 wird analysiert, ob die Circular Economy eine Zukunftsoption für NRW darstellt. Im Ergebnis könnten mit der Innovationsstrategie und dem Klimaschutzplan des Landes synergetisch wirkende, ökonomisch sinnvolle Innovationsprojekte entstehen. Hierdurch könnte Nordrhein-Westfalen in Bezug auf nachhaltige Entwicklung eine Vorreiterrolle nicht nur in Deutschland, sondern auch in Europa übernehmen.

2 Zielstellung der Studie

Der Verband der Chemischen Industrie e.V., Landesverband NRW hat Fraunhofer UMSICHT beauftragt, eine neutrale Studie zur Circular Economy (zirkulären Wirtschaft) zu erstellen. Im Rahmen der Studie sollten Chancen, aber auch Grenzen der zirkulären Wirtschaft herausgearbeitet werden.

Ein zu betrachtender Impuls auf die zirkuläre Wirtschaft wird vom Kreislaufwirtschaftspaket der europäischen Kommission erwartet.

Um die Ergebnisse greifbar zu machen, wurden auf Wunsch des Auftraggebers die folgenden drei Stoffströme im Detail betrachtet:

- Rotorblätter für Windenergieanlagen
- Ein Produkt der Elektronikindustrie (LCD-Flachbildschirme)
- Autoreifen

Leitfragen für die Arbeit waren:

- Welche technologischen, ökonomischen und ökologischen Grenzen gibt es für die angestrebte Circular Economy?
- Welche technologischen Möglichkeiten und Geschäftsmodelle können sich ergeben?
- Welche existierenden oder geplanten gesetzlichen Rahmensetzungen stehen der angestrebten Circular Economy entgegen?
- Welche Rahmenbedingungen sind notwendig, um die Möglichkeiten einer Circular Economy zu nutzen?

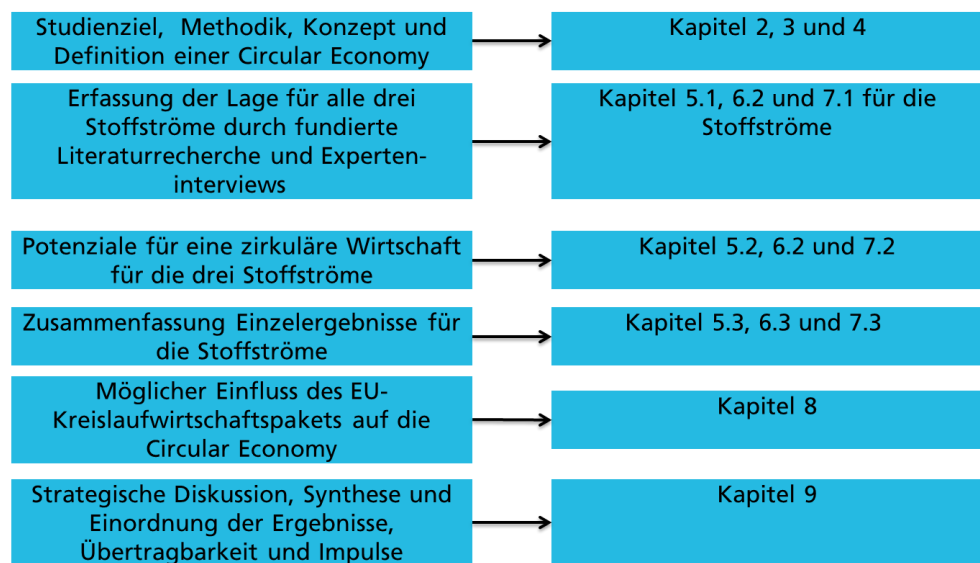
Aus den gewonnenen Erkenntnissen sollten strategische Schlüsse gezogen werden.

3 Vorgehensweise, Recherche und Experteninterviews

3.1 Aufbau und Struktur der Studie

In dieser Studie wurde zunächst die Begrifflichkeit der Circular Economy eingeordnet und definiert (Kapitel 3). In den Kapiteln 5-7 wurden drei Stoffströme (Altreifen, Rotorblätter von Windenergieanlagen und LCD-Bildschirmgeräte) vor dem Hintergrund der Circular Economy untersucht. Dabei wurde zunächst die aktuelle Lage erfasst (Zusammensetzung, rechtliche Anforderungen, Zielvorgaben, Verwertungswege, Akteure, Umweltwirkungen und wirtschaftliche Auswirkungen). Im zweiten Schritt wurden dann die Potenziale der Circular Economy erfasst. Durch das Kreislaufwirtschaftspaket wird ein großer Einfluss auf die Circular Economy erwartet. Daher wird das Paket in Kapitel 8 analysiert (Definition, Forderungen und Entwicklungen sowie Positionen unterschiedlicher Stakeholdergruppen). In Kapitel 9 werden abschließend Strategien, Grenzen, Trade-offs und Potenziale einer Circular Economy sowie Ideen zur Umsetzung diskutiert.

Bild 3-1:
Aufbau der Studie



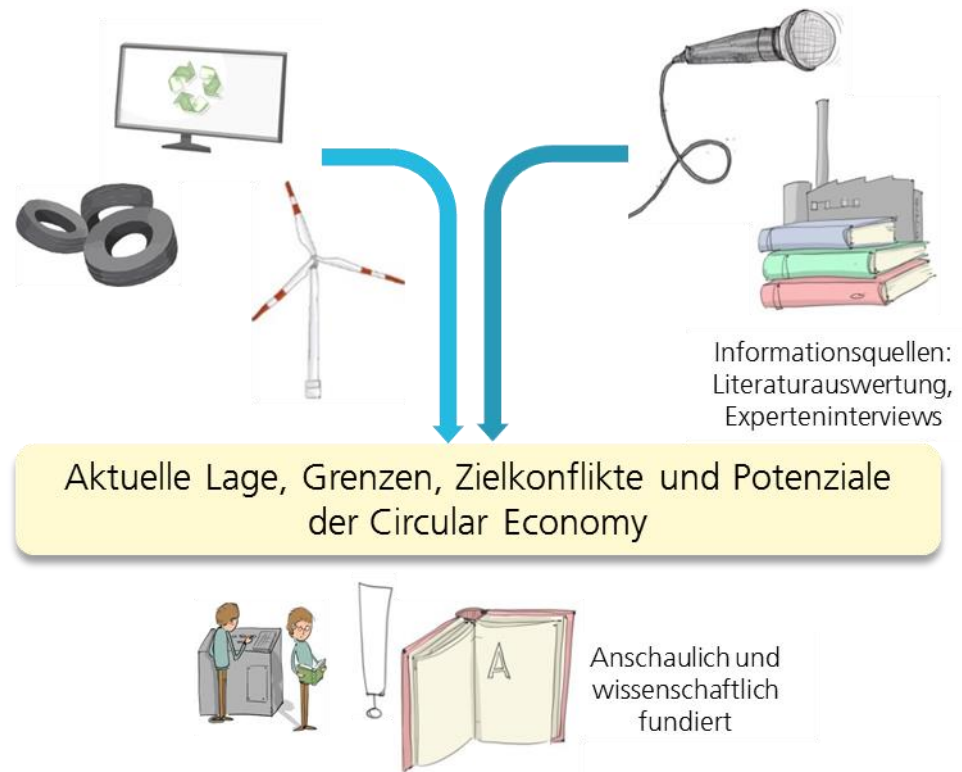
3.2 Vorgehen

Basis der Arbeiten stellte eine umfangreiche wissenschaftliche Literaturrecherche mit dem Fokus auf die definierten Fragestellungen (siehe Kapitel Zielstellung) dar. Bereits vorhandenes institutseigenes Know-how im Bereich der drei Stoffströme und der Circular Economy gingen mit in die Darstellung ein. Aus den zusammengestellten Fakten wurden anschließend Leitfragen herausgearbeitet, die in ausgewählten Experteninterviews diskutiert wurden, um so Drittexpertise mit in das Projekt einzubeziehen. Die Interviews wurden insbesondere dafür genutzt, identifizierte Wissenslücken in der Literatur zu schließen, ungenaue Literaturangaben zu validieren und um Aussagen durch die Experten zu untermauern. So wird eine fundierte Aufstellung über die Potenziale der Cir-

cular Economy sichergestellt. Die gesamte Vorgehensweise ist in Bild 3-2 dargestellt.

Die Arbeiten von Fraunhofer UMSICHT wurden beratend durch einen Industriebegleitkreis und einen Beirat sowie die VCI-Geschäftsstelle unterstützt.

Bild 3-2:
Vorgehen in der Studie



3.3 Experteninterviews

3.3.1 Auswahl der Experten

Fraunhofer UMSICHT hat im Rahmen der Studie eine Liste mit möglichen Experten im Bereich Sachverständige/Forschung, Recycling/Verwertung und Produktion erstellt. Aus dieser Liste wurden in Abstimmung mit dem Industriebegleitkreis und dem Beirat Experten ausgewählt und befragt. Dabei wurden für jeden Stoffstrom mindestens zwei Experten befragt, um die Literaturrecherche abzusichern.

3.3.2 Leitfragen für die Experten

Für jeden Stoffstrom wurden zehn Leitfragen erstellt, die in den telefonischen Experteninterviews verwendet wurden. Die Leitfragen wurden ebenfalls im Industriebegleitkreis und Beirat besprochen und geschärft. Die Erkenntnisse der Interviews fließen in die Kapitel zu den Stoffströmen, zum Kreislaufwirtschaftspaket und auch in das Kapitel zur strategischen Diskussion der Circular Economy ein.

3.4 Auswertungsmethode

Die Auswertung der Erkenntnisse und die Schlussfolgerungen in Kapitel 9 basieren damit auf folgenden Elementen:

- Vergleichende Literaturrecherche
- Experteninterviews
- Input aus Industriebegleitkreis und Beirat
- Strategisches Bewertungs-Know-how von Fraunhofer UMSICHT
- Vergleich der drei unterschiedlichen Stoffströme
- Einordnung aller Ergebnisse in (weltweite) Trends und Vorgaben (EU-Kreislaufwirtschaftspaket)

Dabei wurde für jeden Stoffstrom ein vergleichbarer Aufbau in der Analyse gewählt.

4 Zirkuläre Wirtschaft (Circular Economy)

4.1 Das Konzept der Circular Economy – Entstehung, Rezeption, Definitionen

Es gibt zahlreiche strategische und konzeptionelle Ansätze, um die ökologischen Herausforderungen einer nachhaltigen Entwicklung [Hauff-1987] zu meistern. Einige dieser Ansätze finden ihren Ausgangspunkt in einer Betrachtung des Zustands der Schutzgüter oder der Auswirkungen menschlichen Handelns auf die Umwelt, dazu gehören bspw. die Strategien zum Klima- oder Meeresschutz. Dem gegenüber stehen Strategien, die eher die Ursache in den Blick nehmen; dazu gehören die Ressourceneffizienz, Industrial Ecology, die im Rahmen dieser Studie betrachtete Circular Economy/Kreislaufwirtschaft, aber auch postmaterialistische Ansätze wie die Suffizienz.

Frühe Erwähnung findet die Kreislaufwirtschaft bereits im Zusammenhang mit der Wasserwirtschaft [Poehlmann-1957] oder der Forstwirtschaft [Gleitsmann-1982]. In der Umweltdebatte ist die Idee der zirkulären Wirtschaft spätestens seit 1966 unter dem Schlagwort »Raumschiff Erde« (Spaceship Earth) durch Kenneth Boulding etabliert:

»Die Erde ist zu einem einzigen Raumschiff geworden, auf dem alle Vorratslager, die man anzapfen oder verschmutzen könnte, begrenzt sind, so dass der Mensch seinen Platz in einem zyklischen ökologischen System finden muss, dem ständige Reproduktion in materieller Form möglich ist, wozu es allerdings Energieinput braucht.« [Boulding-1966]

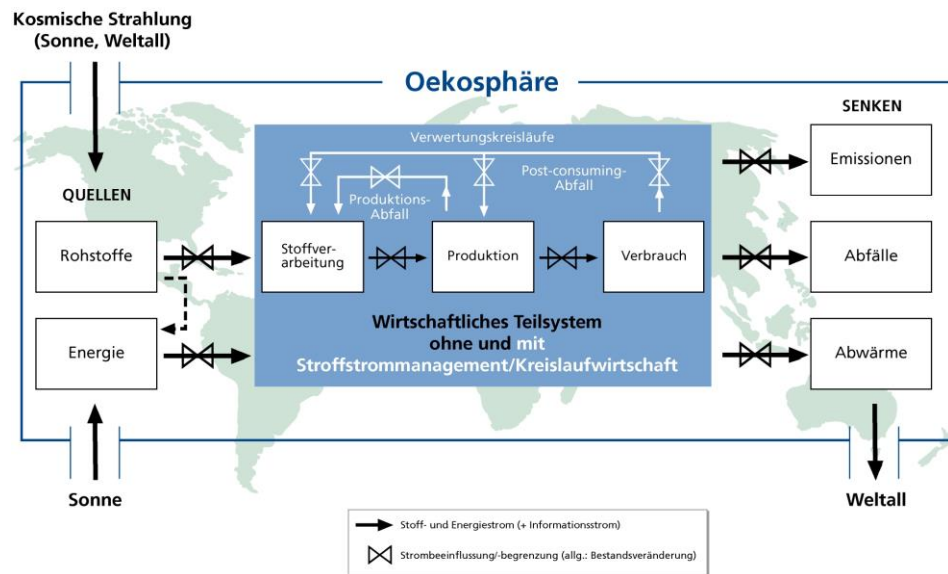
Eine umfassende Beschreibung einer zirkulären Wirtschaft (im Originaltext noch »loop economy«) machte Walther R. Stahel bereits im Jahr 1982 [Stahel-1982]. In sich verschachtelte Kreisläufe (Weiternutzung, Reparatur, Aufarbeitung und Recycling) sowie die Idee, dass Unternehmen den Produktnutzen statt des materiellen Produkts verkaufen sollten, was eine Form der Produzentenverantwortung darstellt (»Stewardship«, konkretisierten sein Konzept einer zirkulären Wirtschaft. Auch Ayres beschreibt 1989 unter dem Oberbegriff »Industrial Metabolism« die Kreislaufführung von Materialien und stellt insbesondere Vergleiche zur Biosphäre an. Im Weiteren benennt er aber auch die Grenzen einer Kreislaufführung, die er vor allem in den dissipativen Materialverlusten erkennt [Ayres-1989], [Ayres-1994].

Die ersten Nachweise für die Verwendung des Begriffs der »Circular Economy« und seiner Ausarbeitung zu einem umfassenden (wirtschaftswissenschaftlichen) Konzept stammen von David W. Pearce aus dem Jahre 1990 [Pearce-1990]. Die Prinzipien der zirkulären Wirtschaft, welche auf die Schließung von Stoffkreisläufen zur Reduzierung der Nutzung von Umweltreservoirs setzt, als Gegenentwurf zu einer rein linearen Durchflusswirtschaft, waren Gegenstand der Umweltdiskussion der 1990er und 2000er Jahre [Eyerer-1996], [Pflaum-1998], [Zahn-1996]. Es wurden zahlreiche methodische Ansätze entwickelt, um dieses Prinzip in Anwendung zu bringen, dazu zählen bspw. *Stoffstrommanagement* [Enquete-1998], [Friege-1998], [Schmidt-1995], *ökologische Produktgestaltung*

[Kreibich-1994], *Integrierte Produktpolitik*, *Ökoeffektivität* [Braungart-1999], [Braungart-2007] und *Industrial Ecology* [Gleich-2008].

Diese Prinzipien zielen darauf ab, das Prinzip der biochemischen Stoffkreisläufe in Ökosystemen [Kümmel-1990] – hier allerdings meist auf Elemente bzw. Makro- und Mikronährstoffe bezogen – auf anthropogene, industrielle Stoffkreisläufe – hier vermehrt komplexe chemische Verbindungen (die in der Natur teilweise nicht vorkommen) und Materialverbunde – zu übertragen [Haas-2015], [Schaffartzik-2014]. Im Modell wird dabei meist eine Ökosphäre und eine Biosphäre von einer wirtschaftlichen oder technischen (anthropogen kontrollierten) Sphäre unterschieden (vgl. Bild 4-1).

Bild 4-1:
Konzept einer Kreislaufwirtschaft als Gegenentwurf zur Durchflusswirtschaft, nach [Pflaum-1998], [Zahn-1996]



Circular Economy, Zirkuläre Wertschöpfung oder Kreislaufwirtschaft?

Die Begriffe »Kreislaufwirtschaft« und »Circular Economy« werden in der aktuellen Diskussion häufig unterschieden. So sieht man den Ursprung der Kreislaufwirtschaft vor allem im Abfallmanagement mit einem Fokus auf die Sammlung und Sortierung von Abfällen. Im Unterschied dazu erweitert die »Circular Economy« den Fokus auch auf Aspekte der Herstellung und Gestaltung kreislauffähiger Produkte [EFA-2016]. Diese Unterscheidung ist aber im Hinblick auf die historische Entwicklung nicht richtig. Bereits in dem Werk »Economics of Natural Resources and Environment« von David W. Pearce aus dem Jahre 1990, das zumeist als Ursprung benannt wird, werden sowohl Aspekte der Kreislaufführung als auch der Produktgestaltung benannt [Pearce-1990]. Die umfangreiche chinesische Literatur zu »Circular Economy« bezieht sich explizit auf die deutsche und schwedische Vorreiterrolle bei der Umsetzung dieses Konzepts [Yuan-2006], und auch in der ersten Fassung des Kreislaufwirtschaftsgesetz wurde bereits in §22 zur Produktverantwortung die Relevanz einer kreislauffähigen Produktgestaltung explizit ausgeführt [KrW-/AbfG-1994]. Als Alternative deutsche Übersetzung wurde auch der Begriff der »Zirkulären Wertschöpfung« vorgeschlagen [MWEIMH-2016]. Die Nutzung des Begriffs »Wertschöpfung« statt »Wirtschaft« lenkt aber den Fokus von der ganzheitlichen systemischen Betrachtungsweise auf die Produkt- und Produktionsseite. »Zirkuläre Wertschöpfung« sollte daher eher als wichtiges Element einer Circular Economy/Kreislaufwirtschaft, nicht aber als zu ihr äquivalent gesehen werden.

Um die Anschlussfähigkeit an die aktuelle Debatte sicherzustellen, wird in der vorliegenden Studie der Begriff der Circular Economy verwendet.

Interessanterweise wurde die praktische Umsetzung einer Kreislaufwirtschaft praktisch parallel zu ihrer theoretischen Fundierung bereits in den frühen neunziger Jahren begonnen. Die Duales System Deutschland (DSD) GmbH und das von ihr betriebene Lizenzmodell »Der grüne Punkt« wurden von den Verpackungsherstellern bereits 1990 als System für die Erfassung und Verwertung von Verpackungsabfällen gegründet, um die Produktverantwortung der Hersteller im Verpackungssektor umzusetzen. 1991 trat dann die Verpackungsverordnung in Kraft, die die Produzentenverantwortung für eine Kreislaufführung festschreibt. Bereits in der Ursprungsfassung dieser Verordnung wird dabei in §1 (1) auf eine Gestaltung von Verpackungen, die die stoffliche Verwertbarkeit sicherstellt, abgezielt [VerpackV-1991].

Eine erste Definition zur Circular Economy wurde vom United Nations Environmental Programme gegeben [UNEP-2006] (Tabelle 4-1). Hintergrund war dabei Chinas nationale Circular-Economy-Strategie, für die die Großstadt Guiyang (3 Millionen Einwohner) als Modellstadt dient. Die Definition betont dementsprechend neben ökologischen Aspekten die wirtschaftliche Entwicklung in besonderer Weise. Die Definition der Europäischen Kommission, die im Rahmen des Kreislaufwirtschaftspakets gegeben wurde, stellt diese Beziehung zur wirtschaftlichen Entwicklung nicht mehr her. Gleiches gilt für die Definition der Ellen-MacArthur-Stiftung, eine Organisation, die die Debatte zur Circular Economy wesentlich mitgestaltet. Beide Definitionen geben allerdings keine Hinweise auf die Gesamteffizienz des Kreislaufs in Bezug auf den Energiebedarf für seine Aufrechterhaltung oder im Hinblick auf die zeitliche Dynamik des Kreislaufs. In der Definition der Ellen-MacArthur-Stiftung ist weiterhin eine Trennung zwischen biologischen und technischen Kreisläufen eingeführt, die aber letztlich nicht sinnvoll ist (vgl. 9.3). Gleiches gilt für die Definition »Zirkuläre Wertschöpfung«. Darüber hinaus wird hier der Begriff »Wirtschaft« auf »Wertschöpfung« reduziert, was dem systemischen Ansatz der Circular Economy nicht gerecht wird. Trotz ihrer Relevanz, die Konzepte zur Kreislaufwirtschaft gerade in Deutschland besitzen, sind detaillierte Definitionen kaum verfügbar. Die vorhandenen Definitionen umfassen nur den wesentlichen Kern der Kreislaufwirtschaft, die Rückführung der Rohstoffe, geben aber keine Hinweise zu sinnvollen Nebenbedingungen. Für politische Prozesse oder konzeptionelle Wissenschaft ist eine Definition, die richtungsweisende Elemente (Effizienz, Vermeidung dissipativer Verluste etc.) enthält, brauchbarer.

Tabelle 4-1: Definitionen zur Circular Economy

Quelle und Jahr	Definition
[UNEP-2006]	»A Circular Economy is an economy which balances economic development with environmental and resources protection. It puts emphasis on the most efficient use and recycling of resources, and environmental protection. A Circular Economy features low consumption of energy, low emission of pollutants and high efficiency. It involves applying Cleaner Production in companies, eco-industrial park development and integrated resource-based planning for development in industry, agriculture and urban areas [...].«
[EC-2015]	»In a circular economy the value of products and materials is maintained for as long as possible; waste and resource use are minimised,

Quelle und Jahr	Definition
	and resources are kept within the economy when a product has reached the end of its life, to be used again and again to create further value.«
[EMF-2016]	A circular economy is one that is restorative and regenerative by design, and which aims to keep products, components and materials at their highest utility and value at all times, distinguishing between technical and biological cycles.
§3 (19) KrWG [BMJV-2012]	Kreislaufwirtschaft ist die Vermeidung und Verwertung von Abfällen.
[Baulexikon-2016]	In der Kreislaufwirtschaft sollen die eingesetzten Rohstoffe über den Lebenszyklus einer Ware hinaus wieder vollständig in den Produktionsprozess zurückgelangen.
[MWEIMH-2016]	Unter Zirkulärer Wertschöpfung versteht man das Konzept einer nachhaltigen, innovationsgetriebenen Wirtschaftsweise, die biologische und technische Kreisläufe differenziert und sukzessive zur Entkopplung des Wirtschaftswachstums von einer Rohstoffentnahme führt. Die Basis bildet ein nutzwertverhaltender Innovationsansatz, durch den die Residualwerte von Produkten und Materialien durch neue Produkte, Verfahren, Geschäfts- und Betreibermodelle maximiert wieder- und weiterverwendet werden können.

4.2 Definition der Circular Economy für diese Studie

Ausgehend von dieser Analyse wird von den Autoren dieser Studie folgende Definition verwendet und für die weiterführende öffentliche Debatte vorgeschlagen.

Definition zur Circular Economy in dieser Studie

»In einer Circular Economy verbleiben die eingesetzten Stoffe über den Lebenszyklus von Waren hinaus in einem Stoffkreislauf. Abfälle, Emissionen, dissipative Verluste und damit auch die Entnahme von Rohstoffen aus der Umwelt sollen dabei soweit möglich verringert werden.

Wichtige Elemente zur Umsetzung einer Circular Economy sind die Wieder- und Weiterverwendung von Waren, das Recycling von Materialien und Stoffen sowie eine Gestaltung der Waren, die eine Kreislaufrführung ohne Verluste in der Qualität ermöglicht. Gleichzeitig muss eine Anreicherung von Stoffen, die eine Kreislaufrführung erschweren und die Akkumulation von Schadstoffen vermieden werden. Dabei soll die Nutzungsdauer von Waren möglichst lang und ihre Rückführung in den Kreislauf zum Ende der Nutzungsdauer möglichst schnell sein.

Eine Nebenbedingung, die die Qualität einer Circular Economy wesentlich mitbestimmt, ist ein möglichst geringer Energiebedarf – der idealerweise aus erneuerbaren Ressourcen gedeckt wird – zur Aufrechterhaltung des Kreislaufs. Stoffe, die nicht im Kreis geführt werden können, sollten einer energetischen Verwertung zugeführt werden.

Materialien, bei denen sich dissipative Verluste nicht vermeiden lassen, sollten abbaubar

sein.

Das Konzept der Circular Economy kann auf Regionen, Branchen, Unternehmen oder einzelne Waren gleichermaßen angewandt werden.«

Ausgehend von der Definition lassen sich die folgenden Prinzipien für eine Circular Economy zusammenfassen (Tabelle 4-2).

Tabelle 4-2: Prinzipien einer Circular Economy

Idealtypische Prinzipien einer Circular Economy

1. Die Verringerung des Ressourcenbedarfs durch Kreislaufführung von Rohstoffen.
2. Eine möglichst lange Nutzungsdauer von Produkten und ihre schnelle Rückführung in den Kreislauf zum Ende der Nutzungsdauer.
3. Eine möglichst effiziente Verwertung durch mehrstufige Wieder- und Weiterverwendung, werkstoffliches und rohstoffliches Recycling.
4. Eine Gestaltung von Produkten, die ihre Kreislaufführung bei minimalen Verlusten in Bezug auf Menge, Wert und Qualität ermöglicht.
5. Die Vermeidung von Kreislaufverlusten sowie eine energetische Verwertung oder ausreichend gute Abbaubarkeit von Stoffen, bei denen sich Kreislaufverluste nicht vermeiden lassen.
6. Die Vermeidung einer Anreicherung von Inhaltsstoffen, die zu späteren Zeitpunkten als Schadstoff² oder die Kreislaufführung erschwerend wirken.
7. Die Minimierung des Energieeinsatzes zur Aufrechterhaltung des Kreislaufsystems und seiner Teilbereiche bei gleichzeitiger Verwendung erneuerbarer Ressourcen (bei Biomasse: nachhaltige Erzeugung).
8. Die Anwendbarkeit des Konzepts auf Regionen, Branchen, Unternehmen und Produkte gleichermaßen.

4.3 Modell für eine Circular Economy

Um den Transformationsprozess hin zu einer Circular Economy zu skizzieren, ist zunächst ein grobes Modell erforderlich, mit dem die relevanten Stoffströme einer Volkswirtschaft verdeutlicht werden können. Bild 4-2 zeigt ein grobes Modell, mit dem für das Bezugsjahr 2005 sowohl für die Welt als auch für die EU-27-Länder eine Materialflussanalyse zur Bestimmung der Zirkularität berechnet wurde [Haas-2015]. Stoffströme auf der Inputseite speisen sich aus Importen aus anderen Volkswirtschaften sowie aus Rohstoffentnahmen aus der natürlichen Umwelt der bilanzierten Volkswirtschaft. Ein Teil des in der Volkswirtschaft verarbeiteten Materials wird wieder exportiert. Das inländisch verarbeitete Material entspricht dann dem DMC³ (Rohstoffentnahme + Importe – Exporte) aus der umweltökonomischen Gesamtrechnung des Statistischen Bundesamtes.

² Zum Begriff des »Schadstoffs« vgl. Glossar

³ DMC: Domestic Material Consumption

Bild 4-2:
Materialflussmodell für
eine Volkswirtschaft,
ergänzt und verändert
nach [Haas-2015]



Rohstoffe und Materialien⁴ werden energetisch und stofflich genutzt. Die energetische Nutzung umfasst die Bereitstellung und Verteilung von Energie, die meist noch durch Verbrennung energiereichen Materials (fossile Rohstoffe, Biomasse) oder durch Kernspaltung erfolgt. Hinzu kommt Biomasse, die für Nahrungs- und Fütterungszwecke angebaut und verarbeitet wird. Jegliche fossilen und biobasierten »Energierohstoffe« werden überwiegend zu Kohlenstoffdioxid (CO₂) sowie anderen »Oxidationsprodukten« und Exkrementen umgewandelt und sind damit für ein Recycling weitgehend verloren [Haas-2015]. Eine zirkuläre Wirtschaft, die CO₂ einsetzt, ist bislang nicht entstanden, obwohl aktuell eine Reihe namhafter Forschungsprojekte genau diesen Weg gehen will⁵.

Abraum, Aufbereitungsabgänge und sonstige nicht nutzbare Mineralstoffe, die im Zuge von Rohstoffgewinnung oder Baumaßnahmen anfallen, stellen einen relativ großen Anteil im Materialfluss dar, dieser Stoffstrom liefert aber in der Regel keinen Beitrag zur Wertschöpfung und wird daher auch kaum recycelt.

Die stoffliche Nutzung umfasst alle metallischen und nichtmetallischen Mineralien sowie biobasierte und fossile Rohstoffe, die nicht primär für energetische Zwecke eingesetzt werden. Dieser Stoffstrom teilt sich auf in Produkte, die typischerweise eine Lebensdauer von bis zu einem Jahr haben (Verpackungen, Papier und Karton, Glasflaschen, Batterien, Tüten, teilweise Textilien) und somit innerhalb dieses Jahres zu EoL-Abfall werden, der potenziell für ein Recycling (grüne Pfeile) zur Verfügung steht.

⁴ Als *Materialien* werden i. A. bereits vorbehandelte/aggregierte Rohstoffe, Zwischenprodukte, Halbzeuge oder vormontierte Komponenten bezeichnet.

⁵ Vgl. z. B. Fraunhofer-Leitprojekt »Strom als Rohstoff« (<https://www.fraunhofer.de/de/forschung/fraunhofer-aktivieren/fraunhofer-leitprojekte/fraunhofer-strom-als-rohstoff.html>), BMBF-Verbundprojekt »Carbon2Chem« (<https://www.thyssenkrupp.com/de/carbon2chem/>), ZIM-Kooperationsnetzwerk »UseCO₂« (<http://www.ibbnetzwerk-gmbh.com/de/service/pressebereich/pm-28072016-useco2-phase-1.html>)

Die anderen Produkte dieses Stoffstroms besitzen Lebensdauern von einigen Jahren und Jahrzehnten (Elektronikgeräte, weiße Ware, Kraftfahrzeuge und Komponenten wie Reifen, Maschinen, Möbel) bis zu Dekaden (Gebäude, Straßen, Kanäle, Stromleitungen, Energieumwandlungsanlagen, Infrastrukturanlagen etc.). Sie erhöhen damit kontinuierlich und immer schneller den materiellen Bestand einer Volkswirtschaft (anthropogenes Lager), da Rückbau und Ausschuss bislang stets geringer ausfallen als die Bestandszufuhr (zeitlich versetzte Wirkung des Wirtschaftswachstums). Rückbau und Ausschuss der langlebigen Produkte bilden gemeinsam mit den kurzlebigen Produkten die gesamte EoL-Materialmenge, mit der sich eine zirkuläre Wirtschaft aufbauen lässt. Allerdings fallen langlebige Produkte – und damit die in ihnen enthaltenen Stoffströme wie Metalle, Mineralien, Flachglas etc. – auch erst nach Jahren oder Dekaden als EoL-Abfall an [Haas-2015]. Der in den Produkten verbaute Materialmix und die zugehörige Materialmenge sind dann oft nicht – mehr – bekannt. Im Gegensatz zu Stoffkreisläufen in Ökosystemen werden in anthropogenen Kreisläufen auch assemblierte, komplexe Materialien und Produkte im Kreislauf geführt und weniger Element-/Molekülströme.

5 Analyse und Einfluss der Circular Economy für Altreifen

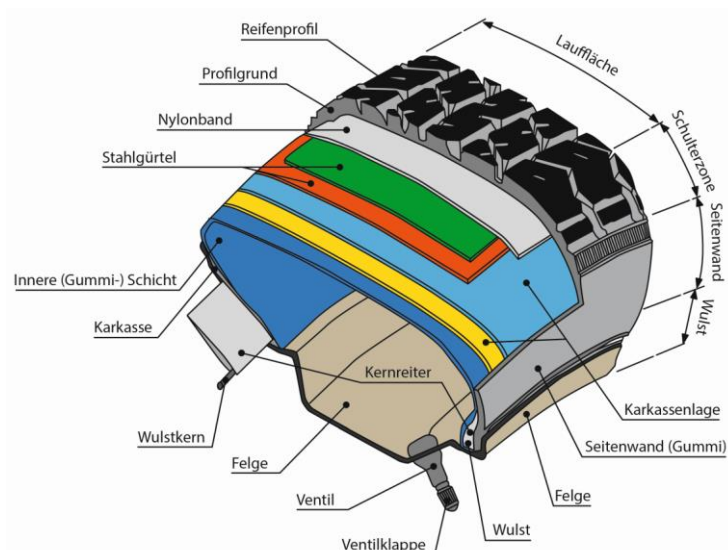
5.1 Erfassung der aktuellen Lage

Im Jahr 1844 wurde das Vulkanisieren durch Goodyear entdeckt, 1845 wurde der erste Luftreifen für Fahrräder zum Patent angemeldet, der wirtschaftliche Durchbruch mit ersten Reifen gelang Michelin im Jahr 1891; der erste Profilreifen für Pkw wurde 1904 von Continental eingeführt. Als verbindendes Element zwischen Straße und Fahrzeug werden an Reifen hohe Ansprüche gestellt. Sie unterliegen hohen dynamischen Belastungen und wechselnden Witterungseinflüssen. Im Ergebnis ist der Reifen heute ein technisch hoch entwickeltes und gleichzeitig auch stark reguliertes Produkt.

5.1.1 Herstellung, Design, Zusammensetzung und Funktion

Der typische Aufbau eines Reifens ist in Abbildung Bild 5-1 dargestellt. In einer größten Einteilung besteht der Reifen aus Karkasse (Grundkörper) und Laufstreifen. Der Laufstreifen besteht ausschließlich aus Gummi, die Karkasse aus Gummi, Stahlcord und Textilfasern in einem komplexen Verbund. Im Reifen werden bis zu dreißig verschiedene Elastomertypen eingesetzt, vornehmlich Styrol-Butadien-Kautschuk (SBR), Naturkautschuk (NR) und Butyl-Isopren-Kautschuk (IIR) [Goodyear-2016], [Sienkiewicz-2012]. Zusammen machen sie einen Gewichtsanteil von ca. 45 % aus (Tabelle 5-1). In die Gummimatrix werden dabei Füllstoffe wie Ruß und Silica, Weichmacher auf Mineralölbasis und zahlreiche Additive eingearbeitet [Pehlken-2004]. Ruß und Silica sind dabei aktive Füllstoffe, die eine verstärkende, Geräusche und Rollwiderstand mindernde Funktion besitzen.

Bild 5-1:
Zusammensetzung
Altreifen nach [Evans-
2006]



Die Karkasse stellt das tragende Element des Reifens dar und besteht aus gummibeschichtetem Textil aus modifizierter Cellulose (Rayon) und Polyamid (Nylon) sowie Stahldrahtlagen. Bei Pkw-Reifen ist der Stahlanteil niedrig, der

Textilanteil hoch, bei Lkw-Reifen ist es umgekehrt. Die Wulste sichern einen optimalen Sitz des Reifens auf der Felge und sind aus speziellem Stahlcord, teilweise umgeben von einem Kernreiter aus Polyaramid eingebettet in Gummi [Bertling-2002].

Tabelle 5-1: Zusammensetzung von europäischen Reifen (Pkw, Lkw) [Sienkiewicz-2012], [Bally-2003]

Stoffe	Zusammensetzung Pkw-Reifen [%]	Zusammensetzung Lkw-Reifen [%]
Naturkautschuk	18-22	20-30
Synthesekautschuk	23-26	15-23
Ruß + Silica	21-28	20-26
Stahl	11-16	18-25
Gewebe	4-6	1
Weichmacher, Additive	9-14	10
Durchschnittliches Gewicht	Neureifen: 8,5 kg Alt Reifen: 7 kg	Neureifen: 65 kg Alt Reifen: 56 kg

Das durchschnittliche Gewicht eines Reifens variiert je nach Anwendung deutlich. In Europa wiegt ein durchschnittlicher Pkw-Neureifen ca. 8,5 kg. Ein Alt Reifen dagegen nur noch 7,0 kg. Der Gewichtsverlust ist durch den Abrieb während der Nutzungsphase zu erklären. Beim Neukauf eines Lkw-Reifens ist mit einem Gewicht von ca. 65 kg zu rechnen. Der Lkw-Alt Reifen wiegt ca. 56 kg. Auch hier kommt der Gewichtsverlust durch den Abrieb zustande.

Der Naturkautschuk für Reifen wird primär in Südostasien hergestellt, wohingegen der Synthesekautschuk überwiegend in Europa produziert wird [nokian-2016]. Die Kautschuke werden anschließend nach für den jeweiligen Einsatzbereich im Reifen optimierten Rezepturen mit den notwendigen Additiven in einem Knetter gemischt, es entstehen sogenannte Felle. Diese werden auf Kalandern zu dünnen Lagen ausgewalzt, in die die textilen Gewebe und Stahldrähte eingebettet werden. Die Lauffläche wird durch Extrusion mit der passenden Dicke und Breite hergestellt. Diese Halbzeuge werden anschließend im sogenannten Reifenrohbau zusammengefügt. Dies findet lagenweise auf einem rotierenden Stahlkern statt. Im ersten Schritt wird eine dünne Kautschukschicht, die vor allem für die spätere Dichtigkeit von Bedeutung ist, aufgetragen. Danach wird eine weitere Kautschukschicht mit Textilgeweben, der Gürtel, aufgelegt. Danach werden die Wulste an den Seiten aufgelegt. Anschließend werden weitere Lagen aus Kautschuk, Textil und Stahlgewebe hinzugefügt und zum Schluss der Laufstreifen aufgelegt. Im Ergebnis entsteht ein Reifenrohling, der noch nicht die endgültige Form besitzt und dessen Kautschuk noch nicht zu Gummi vernetzt ist.

Dieser letzte Schritt findet in einer beheizten Form statt, bei der gleichzeitig der Mittelteil des Reifens aufgeblasen wird, während die Stahlwulste auf dem Kern verbleiben. Durch die Expansion wird der Rohling in die äußere Form gepresst, wodurch er sein Profil und seine Beschriftung erhält. Gleichzeitig wird der Kautschuk des Reifens durch diesen Prozess zu Gummi vernetzt. Erst so erhält

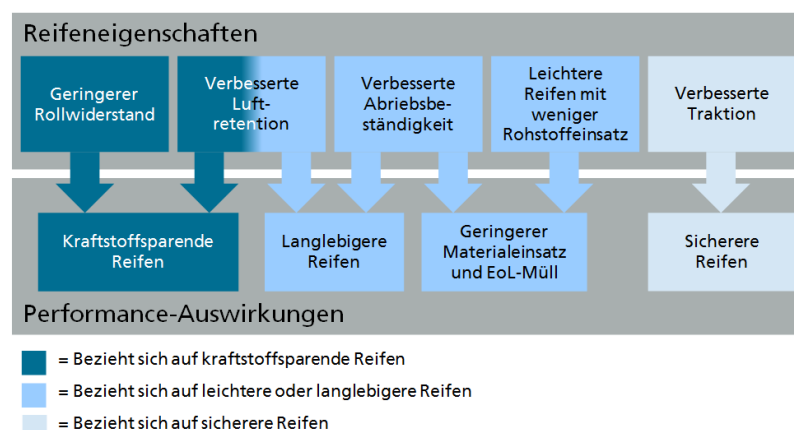
er die notwendige Festigkeit und Elastizität. Im Anschluss wird der Reifen einer umfassenden werksinternen Qualitätskontrolle unterzogen [WBCSD-2007], [rezulteo-2016].

Funktion

Bild 5-2 zeigt die Reifeneigenschaften und die daraus resultierende Performance. Das Design der Reifen ist darauf ausgerichtet, die Kundenbedürfnisse zu befriedigen. Dabei orientiert man sich an dem »magischen Dreieck« bestehend aus Rollwiderstand, Nasshaftung und Abriebsbeständigkeit, welches jedoch sogenannte Trade-offs (Zielkonflikte) beinhaltet [OECD-2014]. Die Verbesserung einer Eigenschaft bewirkt die Verschlechterung einer anderen. Der Rollwiderstand beschreibt die Menge an absorbierter Energie, die während der Rotation aufgrund des Gewichts des Autos entsteht. Eine Verbesserung des Rollwiderstandes ermöglicht die Einsparung von Kraftstoff. Die Laufzeit des Reifens wird vor allem durch die Abriebsbeständigkeit definiert. Für die Sicherheit im Straßenverkehr ist die dritte Eigenschaft des Dreiecks von großer Bedeutung. Die Nasshaftigkeit beschreibt die Fähigkeit des Reifens, einen dauerhaften Kontakt zur Fahrbahn auch bei nasser Fahrbahn sicherzustellen [OECD-2014].

Die fünf Eigenschaften, die in der Abbildung zu sehen sind, bewirken eine Verbesserung der Performance der Reifen in vier Kategorien: Kraftstoffeinsparung, Langlebigkeit, Reduzierung des Materialeinsatzes und End-of-Life-Müll (inkl. der Abriebsverluste) und Sicherheit. Ein geringerer Rollwiderstand in Kombination mit einem dauerhaft optimalen Luftdruck des Reifens ermöglicht Kraftstoffeinsparungen. Des Weiteren schafft eine bessere Dichtigkeit die Voraussetzung für einen langlebigeren Reifen, da der Reifen, wenn er durch einen ausreichenden Druck in seine Optimalform gebracht wird, den mechanischen Belastungen am besten standhalten kann. In Verbindung mit einer verbesserten Abriebsbeständigkeit können leichtere Reifen produziert und gleichzeitig Abriebsverluste der Lauffläche verringert werden. Dies reduziert gleichzeitig den Altreifenanfall. Die verbesserte Traktion des Reifens erhöht die Sicherheit, vor allem auf nassen Fahrbahnen.

Bild 5-2:
Reifen: Eigenschaften
und Produktperformance
nach [OECD-2014]



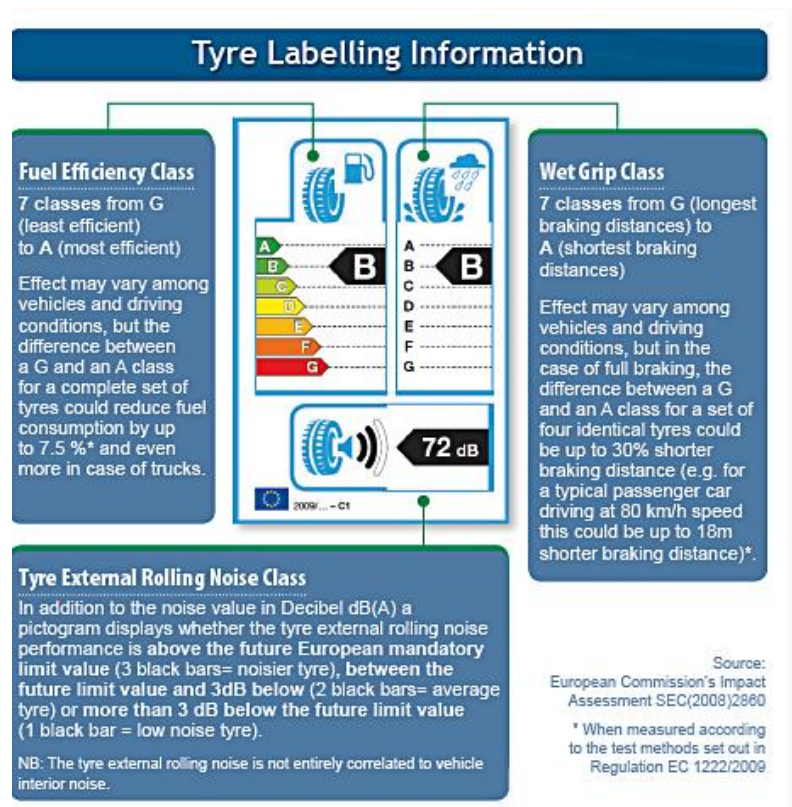
5.1.2 Rechtliche und nutzerseitige Anforderungen an die Produktperformance

Der Reifen ist das in der EU am umfassendsten regulierte Bestandteil eines Autos [ETRM-2015c]. Die Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung (StVZO) regelt in §36 die Bereifung und Laufflächen eines Reifens. §36 Abs. 1 schreibt vor, dass Reifen den funktionalen Anforderungen entsprechen müssen [StVZO-2012]. Das heißt, dass die Betriebsbedingungen erfüllt werden müssen. Des Weiteren ist in Abs. 2 eine Mindestprofiltiefe von 1,6 mm vorgegeben. Diese Mindestanforderung ist für Winterreifen in diversen EU-Ländern jedoch deutlich höher. Beispielsweise gelten Winterreifen in Österreich mit einer Profiltiefe von unter 4,0 mm vor dem Gesetz nicht als Winterreifen und verletzen somit die Winterreifenpflicht [AUTO PLUS-2016]. Der Allgemeine Deutsche Automobil-Club e. V. empfiehlt eine Erneuerung der Reifen bei 3 mm (Sommerreifen) und 4 mm (Winterreifen) Restprofiltiefe bei einer maximalen Laufzeit von 8 Jahren [ADAC-2016]. Die Nutzung von Mischbereifung (Radial –und Diagonalreifen) ist unzulässig und wird in Absatz 2a der StVZO beschrieben [StVZO-2012]. Die Hersteller und Erneuerer von Reifen sind dazu verpflichtet, eine umfassende Kennzeichnung der Reifen vorzunehmen. Dies schließt die Kenntlichmachung der Reifengröße und Geschwindigkeitskategorie mit ein (§36 Abs. 2b). Weitere Anforderungen sind in der Straßenverkehrsordnung (StVO) festgelegt. §2 Abs. 3a der StVO verpflichtet jeden Kfz-Halter dazu, im Winter Winterreifen (M+S Reifen) zu nutzen. Das Bundesverkehrsblatt B 3620 regelt die Zulässigkeit von Reparaturen und Instandsetzung für Reifen. Eine maximal zulässige Grenze bezüglich der Rollgeräuschemissionen ist durch die UN-Verordnung ECE-R 117 definiert.

Bild 5-3 zeigt das seit Ende 2012 für alle Reifen vorgeschriebene Reifenlabel gemäß der EU-Verordnung Nr. 1222/2009 [EP ER-2009b]. Das Reifenlabel umfasst die Kriterien Kraftstoffeffizienz, Nasshaftung und externe Rollgeräusche. Die Kraftstoffeffizienz ist in sieben Klassen unterteilt, die sich von A (beste Klasse) bis G (schlechteste Klasse) erstrecken. Je besser die Klasse, desto mehr Kraftstoff kann im Vergleich zu den anderen Klassen eingespart werden. Die Nasshaftung ist ebenfalls in sieben Klassen mit der gleichen Aufteilung unterteilt. Die Unterscheidung erfolgt nach der beim Bremsvorgang zurückgelegten Strecke bis zum Stillstand der Reifen. Auch hier gilt: Je besser die Klasse, desto weniger Strecke muss bei einem Bremsvorgang zurückgelegt werden. Die dritte Information der Verordnung betrifft die externen Rollgeräusche, die in Dezibel angegeben werden. Die Geräuschintensität wird mit einem Dreibalkensystem wiedergegeben. Erreicht ein Reifen drei Balken, so erfüllt es die zulässige Grenze. Zwei Balken bedeuten geringere Emissionen, die den neuen Anforderungen der EU-Richtlinie (661/2009) entsprechen. Die Kennzeichnung mit einem Balken bedeutet, dass der Reifen die zukünftigen Grenzen einhält [Goodyear-2016]. Diese Informationen sollen dem Kunden eine fundierte Kaufentscheidung nach wichtigen Leistungsmerkmalen ermöglichen.

Die Autoverbände, -konzerne und -zeitschriften nutzen zahlreiche weitere Kriterien zur Bewertung von Reifen, wie beispielsweise die Liste von 50 Leistungsmerkmalen von Goodyear [Goodyear-2010].

Bild 5-3:
Reifenlabel der EU-
Verordnung [ETRMA-
2011]



Eine wichtige Regelung mit Umweltrelevanz adressiert Art. 67 i. V. m. Eintrag 50 des Anhang XVII der REACH-Verordnung. Demnach dürfen die in Reifen oder Reifenteilen eingesetzten Weichmacheröle die Grenzwerte für Benzo(a)pyren von weniger als 1 mg/kg und für alle polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffe (PAK) von weniger als 10 mg/kg gesamt nicht mehr überschreiten [BLAC-2012].

5.1.3 Produktions- und Abfallmengen

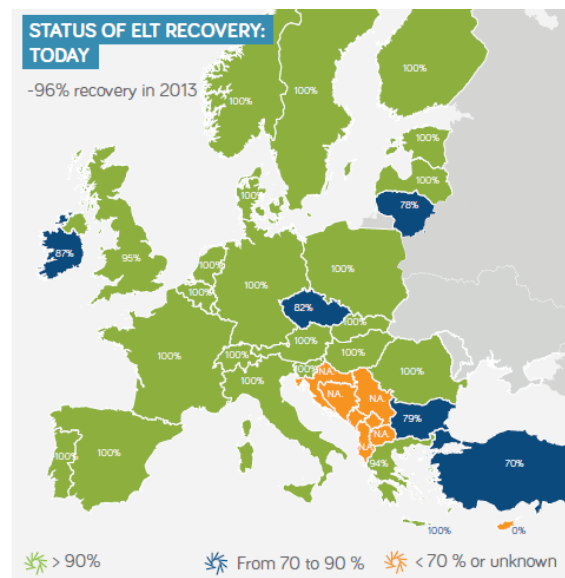
Weltweit werden jährlich 1,4 Milliarden Reifen hergestellt, ungefähr 17 Millionen Tonnen Altreifen fallen jährlich an [Sienkiewicz-2012]. In Europa werden 4,8 Millionen Tonnen Reifen (Stand: 2014) hergestellt (4,67 Millionen Tonnen im Jahr 2013); ungefähr 3,4 Millionen Tonnen Altreifen fallen jährlich in Europa an [ETRMA-2015b; ETRMA-2015c], [Ware-2015]. Die Reifenproduktion verzeichnet seit 2007 einen Rückgang von 9,1 %. Dies birgt eine Gefahr für die Zukunft hinsichtlich der Beschäftigung in diesem Sektor. Seit 2013 haben sich die Importe vor allem aus Asien stetig erhöht. Zunehmende Regulierungen und technische Anforderungen innerhalb von Europa tragen dazu bei, dass der Export von europäischen Reifen in Zukunft schwieriger wird. Dazu kommt, dass der EU-Emissionshandel die Wettbewerbsfähigkeit weiter einschränkt [ETRMA-2015a; ETRMA-2015b; ETRMA-2015c].

In Deutschland werden jährlich ca. 787 000 Tonnen Reifen produziert (abgeschätzt aus dem Kautschukverbrauch). Gleichzeitig fallen rund 568 000 Tonnen Altreifen an (Stand: Juni 2016). Davon werden ungefähr 36 % stofflich verwertet (u. a. als Gummigranulat in Asphalt, Kunstrasen, Gummimatten etc. be-

nutzt), ca. 38 % der Altreifen werden energetisch verwertet [wdk-2015], [GAVS-2016].

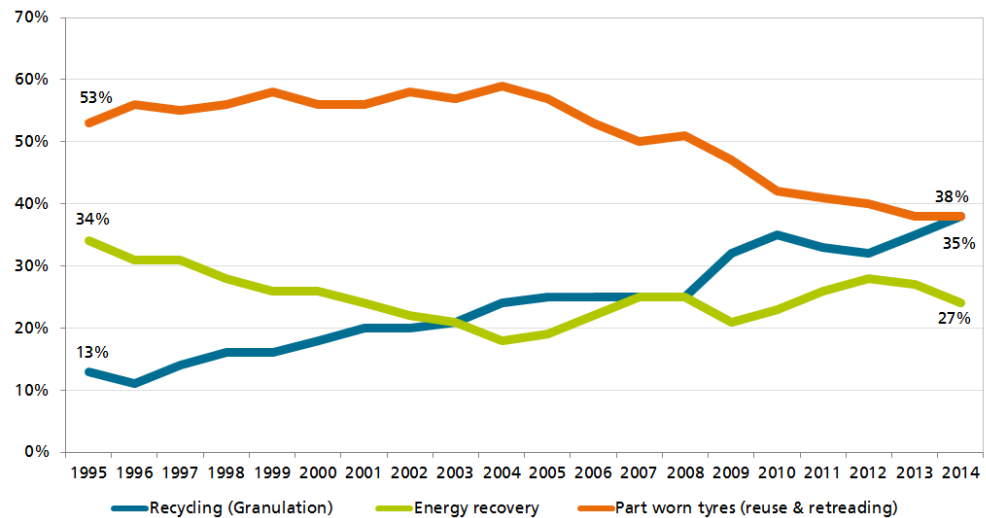
Seit der Verabschiedung der Deponierichtlinie im Jahr 1999 (landfill directive) durch die EU ist die Deponierung von Altreifen verboten, seit 2003 gilt dieses Verbot auch für zerkleinerte Altreifen. Dies hat eine Zunahme der Verwertungsquote für Altreifen in Europa auf 96 % bewirkt, der Trend ist steigend [Rafique-2012]. Es gibt nur noch wenige Länder in Europa, die eine Verwertungsquote unter 90 % besitzen (Bild 5-4). Europa ist im Hinblick auf die Verwertung weltweit führend.

Bild 5-4:
Altreifen: Verwertungsquoten in Europa
[ETRMA-2016a]



Die Entwicklung der drei Hauptverwertungswege werkstoffliche Verwertung (Recycling), energetische Verwertung und Wiederverwendung/Runderneuerung in Deutschland ist in Bild 5-5 dargestellt. Sowohl die energetische Verwertung als auch die Wiederverwendung und Runderneuerung verzeichnen seit 1995 Rückgänge von 53 auf 38 %, bzw. von 34 auf 25 %, angefangen im Jahr 1995. Die werkstoffliche Verwertung hat sich innerhalb von 20 Jahren mehr als verdoppelt und liegt bei 36 %. Insgesamt decken diese drei Verwertungsrouten 99 % der Mengen ab.

Bild 5-5:
Anteil der drei Haupt-
verwertungswege an
der insgesamt verwer-
teten Menge [ETRMA-
2016a]



5.1.4 Aktuelle Zielvorgaben für die Verwertung

Die EU hat zwei Gesetze erlassen, die die Entsorgung der Reifen maßgeblich beeinflussen. Die Richtlinie 1999/31/EG 999 verbietet seit 2006 die Deponierung von Altreifen und wurde in Deutschland in der Deponieverordnung umgesetzt (DepV §7 Abs. 1 Nr. 5). Die Altfahrzeugrichtlinie (2000/53/EG) übt über die dort festgelegten Recyclingquoten (> 85 %) ebenfalls einen Druck in Richtung einer werkstofflichen Verwertung aus. Da vor allem die Schredderleichtfraktion bis heute nur schwer verwertet werden kann, ist die stoffliche Verwertung der Reifen zur Einhaltung der Gesamtquote für das Fahrzeug wichtig.

In Deutschland wird die Altreifensammlung durch das Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) geregelt. Reifen gelten als nicht gefährlicher Abfall (EAK 160130). Seit Juli 2016 entfällt die Heizwertklausel, die eine Gleichrangigkeit von stofflicher und energetischer Verwertung aufgrund des hohen Brennwertes von Reifen definierte. Es kann davon ausgegangen werden, dass davon eine Lenkungswirkung in Richtung Vorbereitung zur Wiederverwendung/Recycling ausgeht. Weiterhin wird im Rahmen der Prüfung zum optimalen Verwertungsweg (§8 Abs. 1 KrWG) aber auch die energetische Verwertung weiterhin möglich sein [BiPRO-2016]. Die Praxis in anderen europäischen Ländern ohne Heizwertklausel stützt diese Vermutung.

Das in Deutschland vom Bundesverband Reifen- und Vulkaniseur-Handwerk (BRV e. V.) eingeführte Zertifizierungssystem für Altreifenentsorger (ZARE) wird bislang nur von 30 % der Altreifenentsorger angenommen [Draws-2016].

Europaweit existieren heute drei verschiedene Rücknahmesysteme für Altreifen (Bild 5-6):

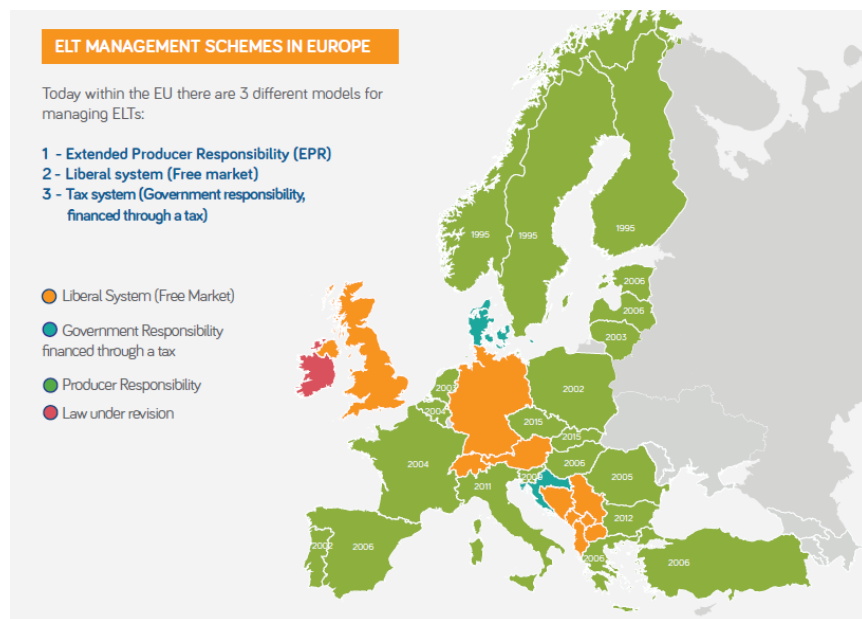
- **Herstellerverantwortung:** Sowohl die Hersteller als auch die Importeure sind dafür zuständig, die Rahmenbedingungen für die Altreifenentsorgung zu schaffen. Die Kosten für die Entsorgung tragen die Unternehmen bzw. werden über die Preise für die Reifen an den Endkunden weitergegeben. Die

Entsorgung findet über non-profit-Unternehmen statt, die für die Einsammlung und Verwertung verantwortlich sind.

- **Besteuerung:** In diesem System wird eine Steuer auf die Reifenherstellung erhoben, die direkt an die Kunden weitergeben werden kann. Da der Staat die Steuer erhebt, ist dieser auch für die Sammlung und Verwertung zuständig, die durch non-profit-Unternehmen durchgeführt werden.
- **Freier Markt:** Das dritte System ist der freie Markt. Der Staat setzt den Rahmen und formuliert Ziele, die erreicht werden sollen, ohne jedoch Verantwortung zu übernehmen. Das heißt, dass alle Akteure unter freien Marktbedingungen handeln und Kooperationen bilden, um bestmögliche Praktiken zu nutzen und anzuwenden. Deutschland nutzt erfolgreich dieses System und besitzt eine Erfassungsquote von nahezu 100 % [ETRMA-2016b], [Rafique-2012].

Die ETRMA setzt sich für eine europaweit einheitliche Umsetzung der erweiterten Produzentenverantwortung ein und erwartet damit eine weitere Zunahme der stofflichen Verwertung.

Bild 5-6:
Rücknahmesysteme für
Altreifen in der EU
[ETRMA-2016a]

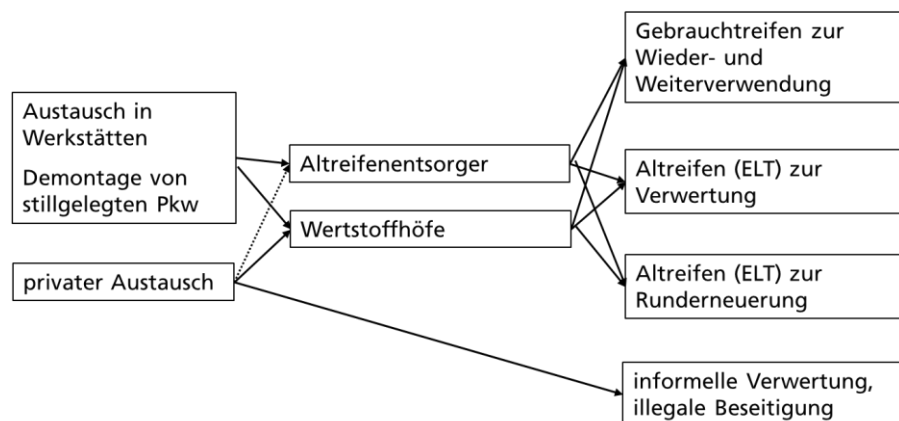


5.1.5 Verwertungswege und ihre Sekundärprodukte

Typischerweise kosten Reifen etwa 25 bis 100 € pro Stück (entsprechend ca. 3 000 bis 8 000 €/t) und können üblicherweise bis zu 50 000 km Fahrleistung eingesetzt werden. Bei einer durchschnittlichen Fahrleistung von 15 000 km pro Jahr und Pkw in Deutschland entspricht dies einer durchschnittlichen Lebensdauer von ca. 3,3 Jahren. Bild 5-7 stellt die End-of-Life-Phase von Reifen nach der ersten Nutzungsphase dar. Sind die Reifen nach einem Wechsel noch in einem ausreichend guten Zustand, ist ihre Weiternutzung als Gebrauchtreifen sinnvoll. Die Preise für Gebrauchtreifen liegen etwa bei einem Drittel von Neureifen, sind aber stark abhängig von der Restprofiltiefe und dem Gesamtzustand. Wird die zulässige Rest-

profiltiefe (auch für mögliche Exportländer) unterschritten oder etwaige Mängel durch den Nutzer oder Werkstätten festgestellt, werden die Gebrauchtreifen zu Altreifen. Die Entsorgung der Gebrauch- und Altreifen kann durch verschiedene Akteure geschehen. Der Altreifenentsorger hat sich auf die Sammlung von Gebrauch- und Altreifen spezialisiert und leitet diese an die entsprechenden Verwerter weiter. Die Wertstoffhöfe repräsentieren einen weiteren Akteur, der jedoch neben Reifen auch andere Stoffe sammelt. Die Kosten für die Abgabe der Reifen liegen bei ca. 1 € (Wertstoffhöfe) bis 3 € (Werkstätten) pro Reifen, entsprechend ca. 125 bis 375 €/t. Die gesammelten Reifen können nach einer Qualitätsprüfung für mehrere Verwertungsoptionen verwendet werden. Dafür werden üblicherweise erneut Annahmegebühren von ca. 75 €/t fällig.

Bild 5-7:
Verwertungsoptionen
nach der ersten Nutzungsphase



Die Verwertungswege von Altreifen umfassen heutzutage prinzipiell die folgenden Optionen:

- **Wieder- und Weiterverwendung:** Dabei werden die Reifen (ggf. nach einer Reparatur) weiter für ihren ursprünglichen oder einen anderen Zweck (Bootsfender, Spielgeräte etc.) eingesetzt. Zur Wiederverwertung zählen auch die Reparatur von brauchbaren Gebrauchtreifen und das Nachschneiden des Profils (Regrooving).
- **Runderneuerung:** Der Status der Runderneuerung ist heute nicht eindeutig geklärt. Die Karkassen könnten sowohl als Wiederverwendung als auch als werkstoffliche Verwertung eingestuft werden. Relevant ist dies insbesondere im Zusammenhang mit einem Ende der Abfalleigenschaft, die vor allem formale Erfordernisse beim Umgang mit dem Stoffstrom bestimmt.
- Die **werkstoffliche Verwertung** umfasst die Zerkleinerung von Altreifen, die Abtrennung von Stahl und Textil und die Weiterverwendung zur Herstellung von Gummigranulat oder -mehl, welche als Zuschlagsstoffe für Anwendungen wie Gummimatten, Straßen- und Sportplatzbeläge verwendet werden. Hierbei handelt es sich im engeren Sinne nicht um ein Recycling, sondern eine Kaskadennutzung. Die Textilphase ist stark mit Gummi verunreinigt. Sie wird verschiedentlich zur Herstellung von Dämmstoffen genutzt oder alternativ energetisch verwertet. Der abgetrennte Stahl ist ein Wertstoff.
- Die **rohstoffliche Verwertung** umfasst Zerkleinerung und weitere Pyrolyse (Depolymerisation), Vergasung und Hydrolyse. Bei der Pyrolyse werden die

vorzerkleinerten Altreifen unter Luftausschluss bei Temperaturen von ca. 600 °C zersetzt. Das Ziel der rohstofflichen Verwertung ist die Rückgewinnung von chemischen Grundstoffen (z. B. Pyrolysegas, Pyrolyseöl, Ruß und Stahlschrott). Die rohstoffliche Verwertung spielt bislang keine Rolle, wird aber im Pilotmaßstab immer wieder erprobt.

- Bei der **energetischen Verwertung** werden die Reifen zerkleinert und anschließend verbrannt. Ziel dabei ist die Energie- und Wärmeerzeugung. Dieser Verwertungsweg stellt zurzeit die wichtigste Verwertungsoption dar. Die Altreifen besitzen einen hohen Heizwert von ca. 30 MJ/kg. Zu den Hauptabnehmern der Altreifen als Brennstoff zählt die Zementindustrie. Da die Altreifen vor der Verbrennung in den Zementofen nur grob oder gar nicht vorgeschreddert werden müssen, ist dieser Verwertungsweg besonders attraktiv. Die Einbindung des in den Reifen enthaltenen Metall- und Silica-Anteils wird verschiedentlich als stofflicher Verwertungsanteil bewertet und bilanziert. Stahl kann aber bei einer vorgelagerten Abtrennung deutlich hochwertiger verwertet werden als durch seine stoffliche Einbindung in Zement oder Klinker.
- **Deponierung** (diese Option ist in der Europäischen Union nicht gestattet) und **Export** von Altreifen.

Bild 5-8 fasst die Verwertungswege von Altreifen zusammen.

Bild 5-8:
Altreifen: Verwertungswege [ETRMA-2011]

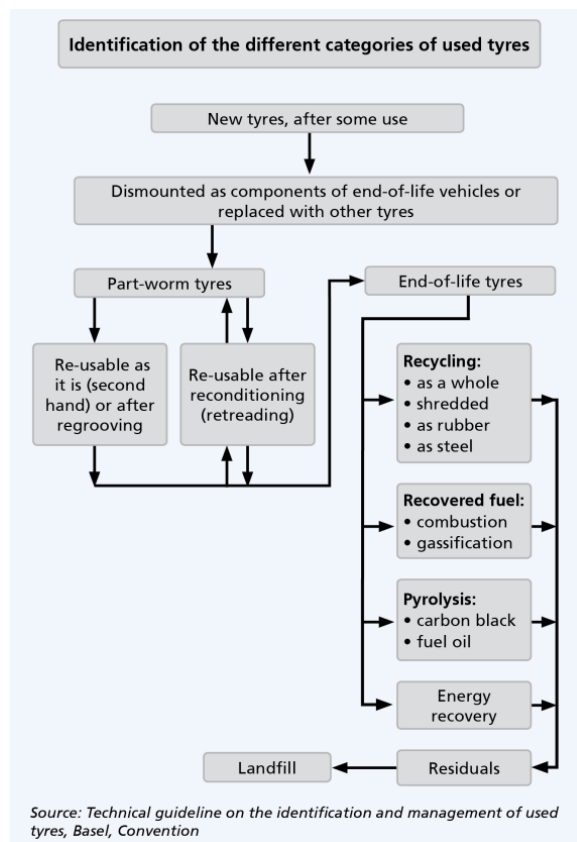


Tabelle 5-2 zeigt die mengenmäßige Relevanz der Verwertungswege von Altreifen und stellt ihnen die Erlöse gegenüber (die Werte für die Erlöse basieren auf eigenen Abschätzungen).

Tabelle 5-2: Übersicht Verwertungswege im Altreifenmarkt [GAVS-2016] und eigene Abschätzung der Erlöse

Verwertungsmöglichkeit	Verwertung in [%/a]	Verwertung in [t/a]	Erlöse [€/t Reifen]
Einsatz in Zementindustrie	37,85	215 000	75*
Stoffliche Verwertung von Gummigranulat/-mehl sowie Stahlschrott	35,74	203 000	200
Export zur Wieder- und Weiterverwendung	11,27	64 000	125
Export zur Runderneuerung	6,69	38 000	130
Karkassen zur Runderneuerung	5,28	30 000	100
Export zur energetischen Verwertung	1,76	10 000	200
Wiederverwertung Inland	1,41	8 000	50
Gesamt	100,00	568 000	-
*eingesparte Kosten für andere Brennstoffe			

5.1.6 Stoffflüsse und Akteurskonstellationen

Zu den größten Herstellern von Reifen weltweit gehörten im Jahr 2015 die Unternehmen Bridgestone, Michelin, Goodyear, Continental und Pirelli [NRZ-2016]. Die nachfolgende Tabelle skizziert eine Auswahl wichtiger europäischer Akteure entlang des Lebenszyklus von Altreifen (s. Tabelle 5-3).

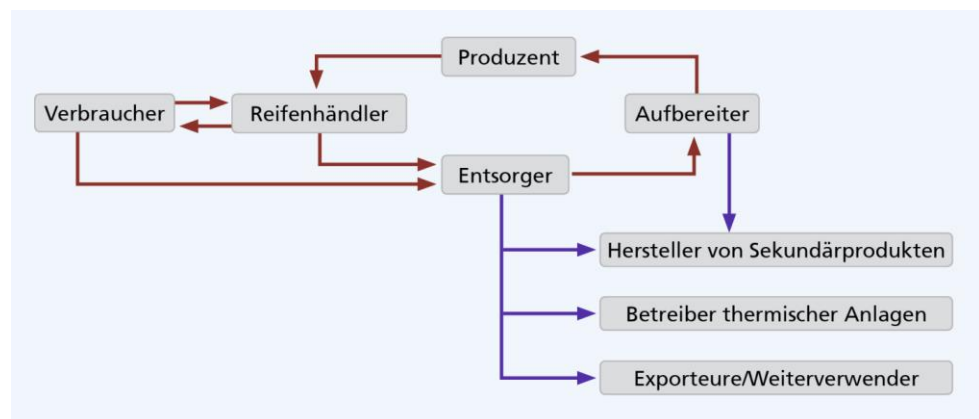
Tabelle 5-3: Übersicht wichtiger Akteure im Altreifenmarkt

Akteur	Sitz	Anspruch/Markt	Website
European Tyre & Rubber Manufacturing Association (ETRMA)	Brüssel (Belgien)	Produzenten	http://www.etrma.org
European Tyre and Rim Technical Organisation (ETRO)	Brüssel (Belgien)	Produzenten	http://www.etrto.org
European Tyre Recycling Association (ETRA)	Brüssel (Belgien)	Entsorger/Aufbereiter	http://www.etra-eu.org/
Bundesverband Reifenhandel und Vulkaniseur-Handwerk e.V. (BRV)	Bonn (Deutschland)	Reifenhändler	http://www.br-v-bonn.de/home/
Wirtschaftsverband der deutschen Kautschukindustrie e.V. (WDK)	Frankfurt am Main (Deutschland)	Produzenten	http://www.wdk.de
Zertifizierte Altreifenentsorgung (ZARE)	Krefeld (Deutschland)	Entsorger/Aufbereiter	http://zertifizierte-altreifenentsorger.de/

Akteur	Sitz	Anspruch/ Markt	Website
International Solid Waste Association (ISWA)	Wien (Österreich)	Entsorger	http://iswa.org
Südbrandenburgischer Abfallzweckverband (SBAZV)	Ludwigsfelde (Deutschland)	Entsorger/ Aufbereiter	http://www.sbazv.de
Recycling Technologies Bayern e. V.	Augsburg (Deutschland)	Aufbereiter	http://www.recycling-technologies-bayern.de/index.php/rtb/Recycling-Loesungen/Altreifen
Bundesamt für Umwelt (BAFU, Schweiz)	Ittigen (Schweiz)	Gesetzgeber	http://www.bafu.admin.ch
Genan	Viborg (Dänemark)	Aufbereiter	www.genan.eu/
Universiteit Twente	Enschede (Niederlande)	Wissenschaft	https://www.utwente.nl
Robert Weibold GmbH	Wien (Österreich)	Berater	http://weibold.com/

Eine funktionierende Kreislaufwirtschaft im Bereich Reifen setzt eine kooperative Zusammenarbeit zwischen den einzelnen Akteuren im Lebenszyklus voraus. Bild 5-9 schematisiert die Interessengruppen entlang des Lebenszyklus von Reifen. Die blauen Pfeile symbolisieren Flüsse aus dem System hinaus, während die roten Pfeile Stoffflüsse innerhalb des Systems beschreiben.

Bild 5-9:
Lebenszyklus von
Altreifen: Interessen-
gruppen (eigene Dar-
stellung)



Um von einem echten Recycling zu sprechen, ist insbesondere der Materialfluss des Sekundärrohstoffs (Gummigranulat, -pulver, Devulkanisat) vom Aufbereiter zurück zum Produzenten wichtig, der sich in der Vergangenheit nur in geringem Umfang entwickeln konnte. Gründe hierfür sind vor allem die Schwierigkeiten bei der Zerlegung des komplexen Materialverbundes und die Irreversibilität der Vernetzung der Elastomere. Letztere ist dafür verantwortlich, dass ein Schmelzen oder Lösen für eine erneute Formgebung der Rezyklate nicht ohne weiteres möglich ist. Die mit dem Einsatz von Gummigranulat oder -mehl verbundenen Qualitätseinbußen sind zum heutigen Stand der Technik für das Produkt Reifen nicht akzeptabel. Darüber hinaus dürfte aufgrund der seit einigen Jahren niedrigen Vorproduktpreise für Natur- und Synthesekautschuk auch das Interesse der Hersteller an Sekundärrohstoffen eher gebremst sein.

Im Gegensatz zur Kunststoffindustrie, in der kleine unabhängige Unternehmen mit dem Produkt Kunststoffrezyklat am Markt gute Chancen haben, ist dies in

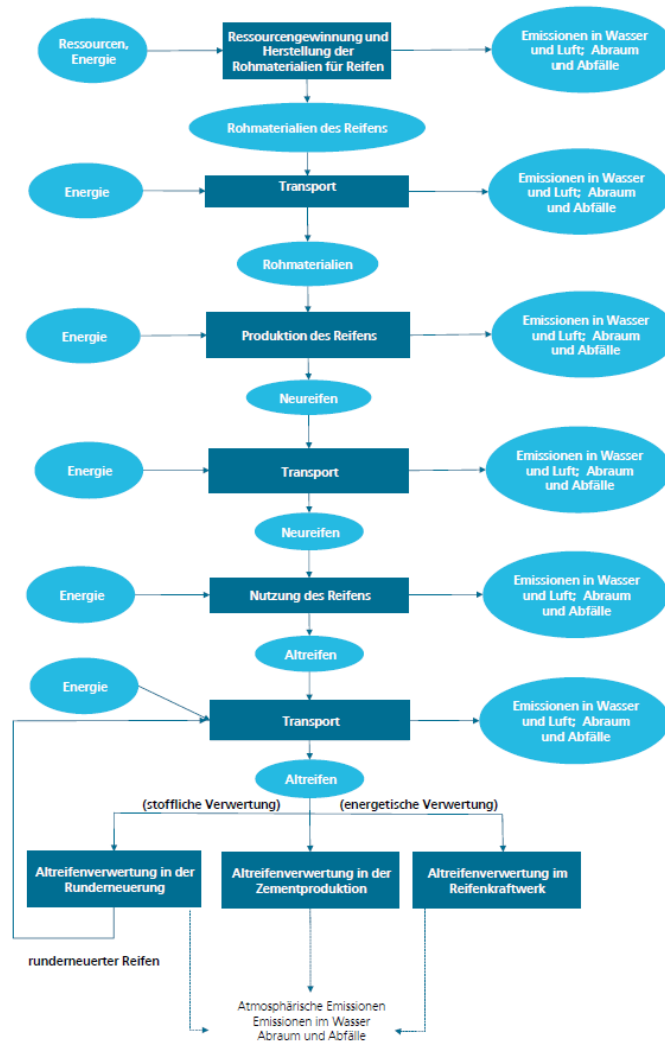
der Gummiindustrie mit ihrer starken vertikalen Integration der Wertschöpfungskette (vom Rohstoff bis zum Endprodukt alles aus einer Hand) nicht der Fall. Bislang führt die beschriebene Situation dazu, dass die von den Aufbereitern hergestellten Rezyklate vor allem zu Sekundärprodukten verarbeitet werden. Dabei werden sie in der Regel mit Polyurethan oder thermoplastischen Kunststoffen als Bindern kombiniert. Die Recyclingfähigkeit vieler dieser Sekundärmaterialien ist bis heute nicht gegeben, wodurch das Problem in andere Anwendungen übertragen wird.

Ein großes Problem stellt die europaweit immer noch existierende illegale Ablagerung von Altreifen dar (hiervon können auch deutsche Altreifenexporte betroffen sein). Als Verursacher der illegalen Entsorgung gelten sowohl Verbraucher als auch vereinzelte illegale Aktivitäten von Unternehmen der Entsorgungslogistik, die ihre Aufgabe im »Einsammeln der Entsorgungsgebühr« oder bestenfalls noch im Aussortieren von für den Export brauchbarer Reifen sehen.

5.1.7 Umweltwirkungen

Zum Vergleich der Umweltauswirkungen, die während des Lebenszyklus von Reifen und Altreifen entstehen, wurden die Daten aus der Literaturrecherche erhoben. Der angenommene Bilanzierungsrahmen für die Neuproduktion von Reifen ist im Bild 5-10 dargestellt [Continental-1999].

Bild 5-10:
Bilanzierungsrahmen
nach [Continental-
1999]



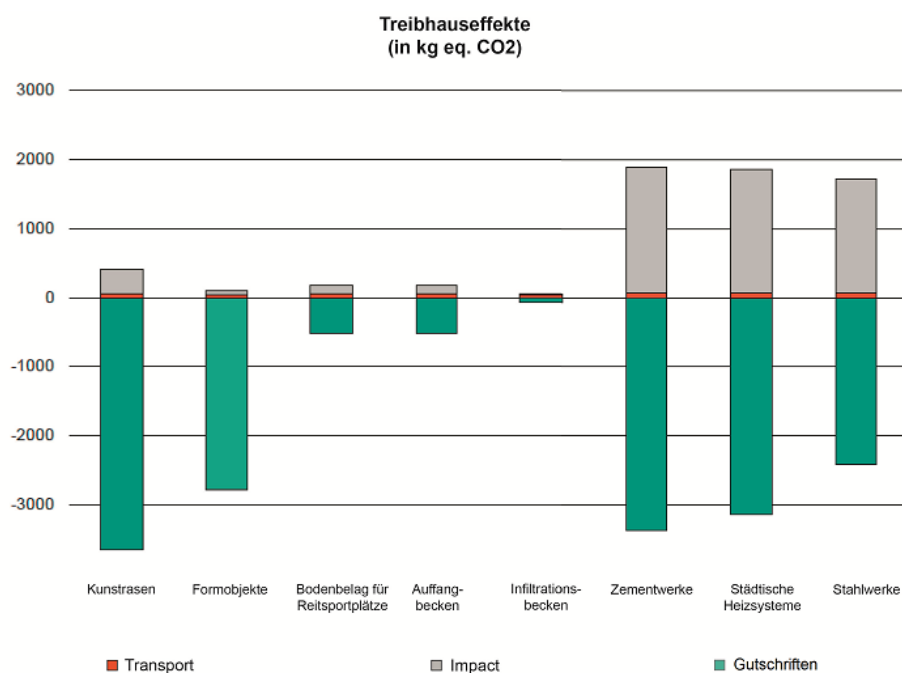
Die Ergebnisse der Ökobilanzierung in diesem Bilanzierungsrahmen zeigen, dass die meisten Emissionen im Lebenszyklus von Pkw-Reifen während der Nutzungsphase erfolgen (durchschnittlich ca. 500 bis 600 kg pro Pkw-Reifen). In der End-of-Life-Phase kann dagegen eine CO₂-Gutschrift nachgewiesen werden [Fiksel-2011]. Ein Grund dafür ist die energetische Verwertung von Altreifen, durch die konventioneller Strom aus dem Strommix ersetzt wird.

Tabelle 5-4: Emissionswerte von konventionellen Pkw-Reifen [Bras-2011]

Emissionen	Produktion	Transport	Nutzung	End of Life	Summe
CO ₂ (kg/Reifen)	26,9	0,029	522	-15,8	533,1
CO (g/Reifen)	4,95	0,008	519	-1,1	522,9
N ₂ O (g/Reifen)	2,15	0,0009	101	-0,3	102,9
SO ₂ (g/Reifen)	6,32	0	237	14,4	258,0

Die Daten zu unterschiedlichen End-of-Life-Szenarien weisen dabei Unterschiede in CO₂-Gutschriften auf: Clauzade vergleicht acht Szenarien der Altreifenverwertung (Herstellung von Kunstrasen, Formteilen, als Bodenbelag in Reitsportplätzen, Herstellung von Auffang- und Infiltrationsbecken, Verbrennung in Zementwerken, Verwendung in städtischen Heizungssystemen und in Stahlwerken) [Clauzade-2010b]. Er kommt zum Ergebnis, dass zu den drei umweltfreundlichsten Verwertungsszenarien die folgenden gehören: Verwertung als Einstreuerganulat in Kunstrasen (synthetic turf), Herstellung von Formteilen (moulded objects) und mit einigem Abstand die energetische Verwertung in Zementwerken. In Bild 5.11 sind für verschiedene Verwertungsmethoden, die aus der Recyclingmethode und dem Transport entstandenen Treibhausgase, den Gutschriften aus der Substitution konventioneller Produkte gegenübergestellt.

Bild 5-11:
Treibhausgasbilanz von
acht Verwertungsverfahren nach [Clauzade-2010b]



5.1.8 Relevanz für Wirtschaft und Beschäftigung

Zu den Interessengruppen, die am Altreifenrecycling verdienen können, zählen Reifenhändler, Altreifenentsorger, Altreifenaufbereiter und Sekundärgummiverwerter. Jedes Unternehmen in dieser Kette beansprucht einen Teil der vom Konsumenten zu zahlenden Entsorgungsgebühr für sich. Altreifenrecycling ist dabei ein Saisongeschäft. Zu Beginn und Ende des Winters werden große Mengen Altreifen im Rahmen des Wechsels von Sommer-/Winterreifen generiert. Der Hauptabsatz von Granulaten und Mehlen findet im Frühsommer statt, wenn Sport- und Spielplätze präpariert werden. Altreifenaufbereiter haben mit diesen Schwankungen häufig zu kämpfen. Abhilfe schafft hier in der Regel eine umfangreiche Lagerhaltung, die mehrere Tausend Tonnen umfasst.

Aus Tabelle 5-2 lässt sich ein Gesamtmarktwert für die Alt- und Gebrauchtreifenverwertung (ohne Herstellung der Sekundärprodukte) von ca. 75 Millionen Euro abschätzen, die Gesamtsumme der Annahmegebühren beträgt ca. 110

Millionen Euro, der Umsatz mit gummigranulatbasierten Sekundärprodukten dürfte bei ca. 150 bis 300 Millionen Euro liegen. Es ergibt sich eine Bruttowertschöpfung für den Sekundärmarkt von ca. 350 Millionen Euro. Dem gegenüber steht eine Gesamtbruttowertschöpfung von ca. 2 100 Millionen Euro im Primärmarkt (zu 50 % des Gesamtumsatzes von 4 240 Millionen Euro. abgeschätzt, der Rest entfällt auf die Vorprodukte).

Die Differenz zwischen der maximalen Gebühr für die Abgabe (»gate fee«) von Reifen und der maximal erzielbaren Wertschöpfung im Falle einer werkstofflichen Verwertung liegt bei ca. 500 € pro Tonne Reifen, bis zum fertigen Sekundärprodukt dürfte sich die Wertschöpfung auf 1 000 bis 2 000 € bezogen auf die eingesetzte Tonne Altreifen erhöht haben. Dem gegenüber steht eine Wertschöpfung bei der Produktion von ca. 2 750 Euro pro Tonne (eigene Schätzung unter der Annahme, dass die Kosten für Vorprodukte inkl. der Gewinne ca. 50 % des Branchenumsatzes ausmachen und das Produktionsvolumen für Reifen bei 770 000 Tonnen pro Jahr liegt).

Für den Betrieb einer Altreifenaufbereitungsanlage, die Granulate und Mehle produziert, mit einer typischen Kapazität von 15 000 Altreifen pro Jahr, werden ca. 20 Personen benötigt. Neben Verwaltung und Vertrieb sind dies insbesondere Maschinenschlosser, Elektriker und eine Reihe von Lager- und Hilfsarbeitern. Daraus kann für das werkstoffliche Recycling allein ein Beschäftigungseffekt von ca. 400 Arbeitsplätzen, für die nachgelagerte Herstellung der Sekundärprodukte von ca. 4 000 Arbeitsplätzen angenommen werden. Dem gegenüber stehen ca. 35 000 Beschäftigte in der Reifenindustrie.

Als grobe Schätzung kann festgehalten werden, dass das Verhältnis von Primärmarkt zu Sekundärmarkt sowohl in Beschäftigung als auch Umsatzzahlen heute etwa 6 zu 1 ist.

5.2 Potenziale einer Circular Economy für Altreifen

5.2.1 Technologische, ökonomische und ökologische Grenzen der Circular Economy

Reifen sind ein Produkt, das zahlreichen Anforderungen unterliegt. Aspekte der Fahrsicherheit und der Minimierung des Kraftstoffverbrauchs sind dabei in der öffentlichen Wahrnehmung die dominierenden Kriterien. Eine Optimierung der Zirkularität bspw. über Kriterien zur stofflichen Verwertbarkeit oder zur Runderneuerungsfähigkeit, die zu Lasten der Fahrsicherheit geht, wird nicht durchsetzbar sein. Gleichzeitig muss aus einer lebenszyklusweiten Betrachtung festgestellt werden, dass Treibhausgasemissionen, kumulierter Energieaufwand und die meisten anderen Umweltwirkungen vor allem von der Nutzungsphase bestimmt werden; so würde eine angenommene Verschlechterung des Rollwiderstands durch Runderneuerung und Rezyklateinsatz um nur einige Prozent alle Vorteile des reduzierten Primärrohstoffeinsatzes ins Negative überkompensieren.

Eine Steigerung der Zirkularität von Reifen erfordert daher im besonderen Maße Strategien für eine multikriterielle Optimierung, die ggf. auch unter Berücksichtigung von Lernkurven über weniger effiziente Zwischenschritte stattfinden müssten, um einen radikalen Pfadwechsel bspw. hin zu einem »tyre-to-tyre«-

Recycling zu ermöglichen. In Bezug auf den jährlichen Ersatzbedarf erreicht der »recycled content« des Gesamtstoffstroms »Reifen« heute nur ca. 7 %. Dieser Wert lässt sich im Wesentlichen auf das Konto der Runderneuerung von Lkw-Reifen zurückführen. Die Runderneuerung wird dabei bereits bei dem Entwurfsprozess des Reifens berücksichtigt. Die Runderneuerung von Pkw-Reifen hat in Deutschland keine mengenmäßige Relevanz. Der »recycled content« sinkt seit Jahren, in 2008 lag er noch bei ca. 15 %. Gründe dafür sind niedrigpreisige Importe, die gegenüber runderneuertem Reifen zumeist den Vorzug erhalten.

Reifen können zum heutigen Stand der Technik in die drei Hauptfraktionen Gummi, Stahl und Fasern zerlegt werden. Doch damit wird der komplexe Verbund des Reifens nur sehr mäßig aufgeschlossen. Für die Stahlfraction (12 bis 25 %) ist ein Recycling problemlos möglich. Die Gummifraction kann ab einer Korngröße von ca. 1,5 mm weitgehend stahl- und faserfrei gewonnen werden. Der weitere Aufschluss des Gummis in die verschiedenen Gummitypen (bis zu 30 biobasierte und synthetische Typen), die Abtrennung von Silica und Ruß oder gar die Rückgewinnung der Additive und Weichmacheröle ist bis heute nicht möglich.

Die größte technische Herausforderung für das Reifenrecycling ist aber die Devulkanisation – das Rückgängigmachen der Vernetzung vom Elastomer zum Kautschuk. Sie ist bis heute im technischen Maßstab nicht realisiert. Es existieren zwar Verfahren zum physikalischen Reclaiming, einer thermomechanischen Behandlung des Gummis, welche im Ergebnis zu einem kautschukähnlichen Sekundärrohstoff führen. Diese Verfahren wirken aber wenig selektiv und zerstören das Polymergerüst, was deutliche Einbußen bei den Werkstoffeigenschaften zur Folge hat. Chemische Verfahren zum Reclaiming, die selektiv die Vernetzungsstellen im Elastomer lösen, wurden bisher nur im Pilotmaßstab realisiert. Theoretisch könnte auch in gewissen Grenzen ein minderwertiger Sekundärstoffstrom in die Reifenproduktion einfließen. In Bezug auf die notwendige Zudosierung von Frischmaterial und zur Frage, ob es bei Mehrfachkreisläufen zu einer Anreicherung funktions- oder umweltkritischer Abbauprodukte kommt, besteht aber noch eine große Wissenslücke [Myhre-2012]. Die Fasern (1 bis 4 %) im Reifen bestehen entweder aus Polyamid (Nylon) oder modifizierter Cellulose. Ihre Anbindung an die Gummiphase ist durch Haftmittel optimiert. Sie lassen sich daher im Recyclingprozess nur schwer vollständig gummi-frei gewinnen.

Im Ergebnis dominiert bei Reifen in der stofflichen Verwertung die Kaskadennutzung der zerkleinerten und von Stahl und Fasern befreiten Gummigranulate und -mehle als elastifizierende Zuschläge für Straßenbau, Formteile oder Böden von Sport- und Spielplätzen etc. In vielen Fällen substituieren die Altreifengranulate dabei andere Materialien wie Sand (Einstreugranulate für Kunstrasen) oder Holzhackschnitzel (Fallschutz auf Spielplätzen). Inwieweit diese Substitutionen im Sinne einer Circular Economy wirken und zu echten Ressourceneinsparungen beitragen, ist im Detail noch nicht belegt.

In vergleichenden Ökobilanzen wurde gezeigt, dass die energetische (Kraftwerk) oder rohstoffliche Verwertung (Zementherstellung, Pyrolyse) eine ökologisch sinnvolle, aber der stofflichen Verwertung unterlegene Verwertung dar-

stellt [Feraldi-2012], [Clauzade-2010a]. Auch die häufig vorgebrachten Argumente, dass bei der energetischen Verwertung im Zementofen eine gekoppelte stoffliche (Stahl, Silica) und energetische Verwertung (Fasern, Gummi, Ruß) stattfindet, stimmt nur unter Einschränkungen, da der Stahl hier im Vergleich zur Verwertung im Elektrostahlwerk einem erheblichen Downcycling unterliegt. Eine detaillierte Betrachtung, die das EoL nach der Kaskadennutzung in den Blick nimmt und die Möglichkeiten einer erneuten Kreislaufführung oder energetischen Verwertung vergleichend untersucht, steht noch aus.

Ein Aspekt, der der stofflichen Verwertung entgegenwirkt, sind die zulässigen Restgehalte an polyaromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK) für Reifen von 10 mg/kg. Die EU plant, die Grenze von 1 mg/kg, die heute bereits für bestimmte Verbraucherprodukte gilt, auch auf Anwendungen, in denen Altreifengranulate zum Einsatz kommen, auszuweiten. Sollte diese Regelung praktiziert werden, ist ein Zusammenbruch der stofflichen Verwertung in Europa möglich und vermehrte Exporte ins außereuropäische Ausland wären eine wahrscheinliche Folge [EUWID-2016].

Eine Besonderheit bei Reifen sind die hohen dissipativen Materialverluste durch Abrieb. Aus einer Bilanz am einzelnen Reifen lassen sich diese auf bis zu 15 %, aus einer nationalen Mengenzahlung auf ca. 8 % abschätzen. Der Abrieb wird dabei durch Niederschlagswasser von der Straße weggeschwemmt und reichert sich in den Böden entlang der Straßen an, gelangt in den Klärschlamm oder direkt in die Vorfluter. Der Abrieb von Autoreifen ist heute nach bisherigem Wissensstand die größte Quelle für Mikroplastik. Es wird allerdings angenommen, dass die polymere Matrix bereits in zwei Jahren vollständig abgebaut wird. Im Boden reichern sich dadurch aber das Schwermetall Zink und als Begleitmetalle im geringeren Umfang auch Cadmium und Blei an. Rezepturvariationen bei Reifen konnten bislang nicht zu einer deutlichen Reduktion des Abriebs beitragen. [Continental-1999], [EUWID-2016a].

Der grenzüberschreitende Import und Export von Alt- und Gebrauchtreifen beträgt ca. ein Drittel der Gesamtmenge, ist derzeit aber weitgehend ausgeglichen, so dass keine quantitativen Sekundärrohstoffverluste auftreten [wdk-2013]. Änderungen in den regulatorischen Randbedingungen können dies aber aufgrund der etablierten internationalen Verbreitungswege schnell ändern.

5.2.2 Innovationspotenziale und Geschäftsmodelle der Circular Economy

Aus heutiger Perspektive scheint das größte Potenzial in einer massiven Ausweitung der Runderneuerung über die Lkw hinaus auch im Bereich der Pkw zu liegen. Dabei muss die Runderneuerbarkeit als zentrales Kriterium in der Produktentwicklung durch die Hersteller verankert werden. Runderneuerte Reifen würden einen »recycled content« von ca. 85 % besitzen. Dabei erscheint es sinnvoll, wenn diese Runderneuerung vor allem von den Reifenherstellern selber als alternative Produktionslinie verstanden wird⁶. Continental und Michelin haben diesen Weg bereits eingeschlagen [Continental-2015], [Michelin-2016].

⁶ Dieser Weg wird heute für Lkw-Reifen genutzt, für Pkw ist er zurzeit aufgrund von Niedrigpreisimporten aus Fernost nicht wirtschaftlich.

An dieser Stelle bieten sich – auf diesem Gedanken aufbauend – auch Geschäftsmodelle an, in denen nicht die Ware »Reifen«, sondern der Service »Fahrleistung« verkauft wird. Aus Verbrauchersicht wäre im Falle der Realisierung eines solchen Geschäftsmodells die Unterscheidung zwischen neuen und runderneuten Reifen weitgehend obsolet.

Ein wichtiges Feld für Innovationen wären weiterhin Strategien zur Devulkanisation. Es ist allerdings fraglich, ob diese auf dem bisher eingeschlagenen Weg, die Vernetzung der etablierten natürlichen und synthetischen Kautschuke chemisch aufzutrennen, realistisch ist. Dies nicht zuletzt deshalb, weil diese Bemühungen bereits über den gesamten Zeitraum der Gummiverwendung andauern. Ein vielversprechender Ansatz könnte darin liegen, Elastomere zu entwickeln, deren Vernetzungen von vornherein reversibel gestaltet ist. Prinzipiell liegen solche Materialien mit den thermoplastischen Elastomeren bereits heute vor – sie erreichen bislang aber bei weitem nicht die notwendige Performance.

Sekundäranwendungen für Gummigranulate werden noch lange relevant sein und dissipative Verluste durch Abrieb werden sich auch zukünftig kaum vermeiden lassen. Vor diesem Hintergrund besteht ein erheblicher Bedarf für die Schadstoffentfrachtung von Reifen. Die Reduktion der Schwermetallgehalte sowie die Verringerung der PAK-Gehalte in den Vorprodukten (Ruß und Mineralöl) wären hier wichtige Strategien. Gleichzeitig wäre es aber auch sinnvoll, aufgrund der großen Mengen Gummi, die in die Umwelt gelangen, detaillierte Untersuchungen zum Abbauverhalten in den jeweiligen Umweltkompartimenten durchzuführen. Die meisten Informationen diesbezüglich referenzieren Forschungsarbeiten aus den frühen 80er Jahren. Darauf aufbauend sollte eine Rezepturentwicklung stattfinden, die den Abrieb und die mit ihm verbundenen Umweltwirkungen angemessen berücksichtigt.

Reifen bestehen bereits heute zu einem guten Teil aus biobasiertem Naturkautschuk, die Erschließung weiterer nachwachsender Rohstoffquellen ist daher vielversprechend. Sie wirkt sich positiv – weil weitgehend klimaneutral – auf die energetische Verwertung aus, die neben der stofflichen Verwertung noch längere Zeit ein wichtiges Element der Verwertung bleiben wird.

5.2.3 Politische und regulatorische Hemmnisse für die Circular Economy

Reifen sind ein stark reguliertes Produkt; so ist die Lebensdauer durch die Mindestprofiltiefe (1,6 mm) festgelegt (STVZO §36). Der ADAC als wichtiger Interessenvertreter der Nutzer empfiehlt darüber hinaus unabhängig von der Restprofiltiefe einen Austausch nach 8 Jahren. Weiterentwicklungen, die eine Abriebsminderung und damit eine Verlängerung der Lebensdauer zum Ziel haben, müssen daher vor allem auch belegen, dass sie dies ohne Festigkeitseinbußen über die verlängerte Laufzeit erreichen. Die Zulässigkeit von Reparaturen, die ebenfalls ein Weg sein kann, um die Laufzeit zu verlängern, wird durch die Regelungen im Bundesverkehrsblatt B 3620 beschränkt.

Ein wichtiges Steuer- und Bewertungsinstrument ist das europäische Reifenlabel (EU-Verordnung Nr. 1222/2009). In seiner jetzigen Form hat es keine positiven Wirkungen in Richtung Circular Economy, sondern lenkt die Aufmerksamkeit in den Umweltwirkungen stark auf das Kriterium Kraftstoffverbrauch. Die

REACH-Verordnung, die für Reifen und Reifenteile PAK-Gehalte von < 10 mg/kg vorschreibt, ist letztlich im Hinblick auf ein nachfolgendes Recycling nicht anspruchsvoll genug. Die Grenzwerte sollten so angepasst werden, dass Kaskadennutzungen in Anwendungen, die näher am Verbraucher sind und die außerhalb von REACH geringere Konzentration erfordern, auf Dauer möglich sind.

Für Reifen besteht seit 2006 europaweit ein Deponierungsverbot, das in einigen Staaten aber immer wieder unterlaufen wird. Die EU strengt derzeit entsprechende Verfahren an, um dies zu unterbinden. Auf europäischer Ebene könnten die unterschiedlichen Entsorgungssysteme in den Einzelstaaten dazu führen, dass Mengen dorthin verbracht werden, wo sie kostengünstig verwertet werden. Gleichzeitig sind in Ländern mit erweiterter Produzentenverantwortung aufgrund der höheren Annahmevergütung günstigere Verkaufspreise für Sekundärrohstoffe darstellbar, was die Akteure aus Systemen des freien Markts zunehmend unter Druck setzt.

Das Zertifizierungssystem für Altreifenentsorgungssysteme in Deutschland (ZARE) wird derzeit nur von 30 % der auf diesem Gebiet tätigen Entsorgungsunternehmen angenommen, was eine gleiche Qualität in der Verwertung erschwert.

Die Vorgabe von Quoten für die Wiederverwertung und das Recycling von Altfahrzeugen mit 85 % wird den Druck in Richtung stoffliche Verwertung aufrechterhalten. Eine kritische Analyse, welche Stoffe aus Altfahrzeugen sich leichter oder schlechter rezyklieren lassen als Altreifen, fehlt bislang.

Der Wegfall der Heizwertklausel (seit 07/2016) wird eine energetische Verwertung auf lange Sicht vermutlich nur noch am Ende einer Kaskadennutzung zulassen. Wie konsequent die Abfallhierarchie tatsächlich umgesetzt wird, ist zum Zeitpunkt dieser Studie noch offen.

5.2.4 Notwendige Rahmenbedingungen und Impulse zur Umsetzung der Circular Economy

Folgende Maßnahmen erscheinen sinnvoll, um die Zirkularität des Stoffstroms Altreifen zu steigern:

- Stärkung der Forschungsaktivitäten zur Runderneuerung und zur Devulkanisation bzw. reversibel vernetzbaren Elastomeren sowie zur Minderung der Schadstoffgehalte von Reifen.
- Steigerung des »recycled content« im Stoffstrom Reifen, ggf. Erweiterung des EU-Reifenlabels um dieses Kriterium, dem »recycled content« sollte dabei im Vergleich zu EoL-Recyclingquoten möglichst eine Priorität eingeräumt werden.
- Anforderungen an den »recycled content« oder an die stoffliche Verwertung sollten dynamisch an die Entwicklungsfortschritte angepasst werden, dabei sollte die Bewertung durch eine lebenszyklusweite Ökobilanzierung begleitet werden, die allerdings die Substitutionen, die mit dem Recycling verbunden sind, deutlich kritischer als heute in den Blick nehmen muss.

- Im Rahmen der grünen Beschaffung öffentlicher Institutionen sollten rund-erneuerte Reifen eingesetzt werden.
- Vereinheitlichung von Grenzwerten für Schadstoffe über die verschiedenen Schritte bei Kaskadennutzungen; die Runderneuerung sollte entweder als Vorbereitung zur Wiederverwendung definiert werden, oder den Karkassen sollte zumindest der Status »Ende der Abfalleigenschaft« zugeschrieben werden.
- Die unterschiedlichen Entsorgungssysteme innerhalb der EU sowie die Zertifizierung von Abfallentsorgern sollten vereinheitlicht werden.

5.3 Zusammenfassung Stoffstrom Altreifen

Reifen sind ein komplexes Verbundbauteil, dessen werkstoffliches Recycling durch Vielfalt und Haftung der Komponenten und vor allem durch die irreversible Vernetzung des Matrixmaterials Gummi erschwert wird. Die heutige stoffliche Verwertung von Altreifen ist daher durch eine Kaskadennutzung geprägt, bei der zahlreiche Sekundärprodukte entstehen wie elastifizierter Asphalt, Fallschuttmatten, Einstreugranulate für Kunstrasen etc. In Bezug auf Bruttowertschöpfung und Beschäftigungszahlen erreicht der Sekundärmarkt für altreifenbasierte Produkte zum heutigen Stand ca. 1/6 des Primärmarktes. Eine kritische Betrachtung, ob durch den Sekundärmarkt Ressourceneinsparungen erreicht wurden, oder ob hier Reboundeffekte im Sinne der Schaffung neuer Anwendungen und Märkte vorliegen, steht noch aus.

Zur Steigerung der Zirkularität wären vor allem die beiden folgenden Ansätze zielführend:

1. Deutliche Steigerung des »recycled content« durch den Einsatz von Sekundärrohstoffen oder Karkassen (oder anderen Elementen des Reifens) in der Neuproduktion von Reifen.
2. Intensivierung der Forschung und Entwicklung zu neuen Konzepten für die Runderneuerung und Devulkanisation von Gummi (inkl. der Entwicklung neuer Reifenwerkstoffe, die sich reversibel vernetzen lassen) sowie zur Schadstoffentfrachtung (z. B. PAK, Schwermetalle) von Reifen.

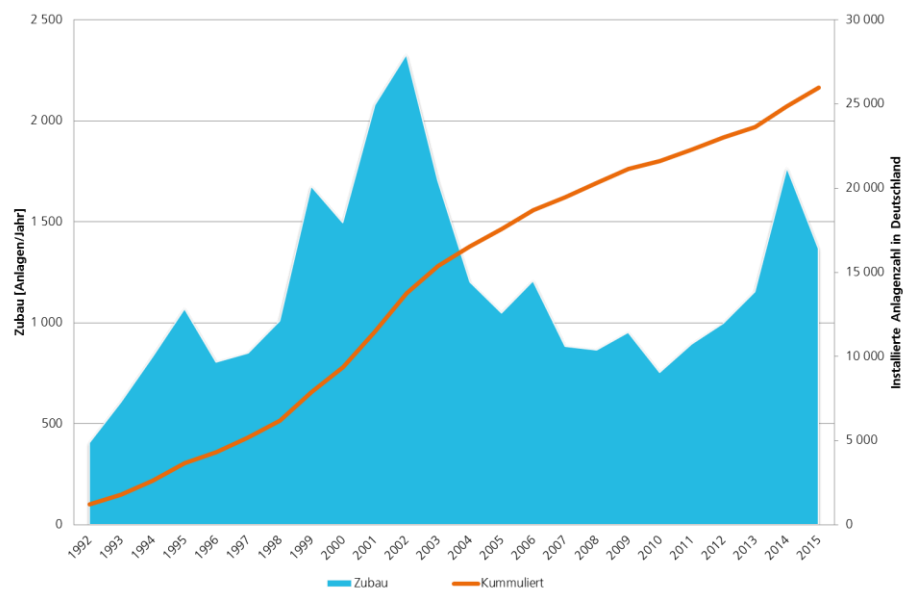
Eine Anhebung der EoL-Recyclingraten hingegen wäre gerade bei einem Material wie Gummi, dessen Herstellungsprozess sich weder einfach umkehren noch wiederholen lässt, nicht zielführend, sondern würde zur »Erfindung« neuer Sekundäranwendungen führen. Man kann aber davon ausgehen, dass vieles von dem, was aus heutiger Sicht mit Altreifen und insbesondere Gummigranulat wirtschaftlich sinnvoll gemacht werden kann, bereits geschieht. Ansonsten würden die Anteile der energetischen Verwertung deutlich schneller schrumpfen, als sie es zurzeit tun.

6 Analyse und Einfluss der Circular Economy für Rotorblätter von Windenergieanlagen

6.1 Erfassung der aktuellen Lage

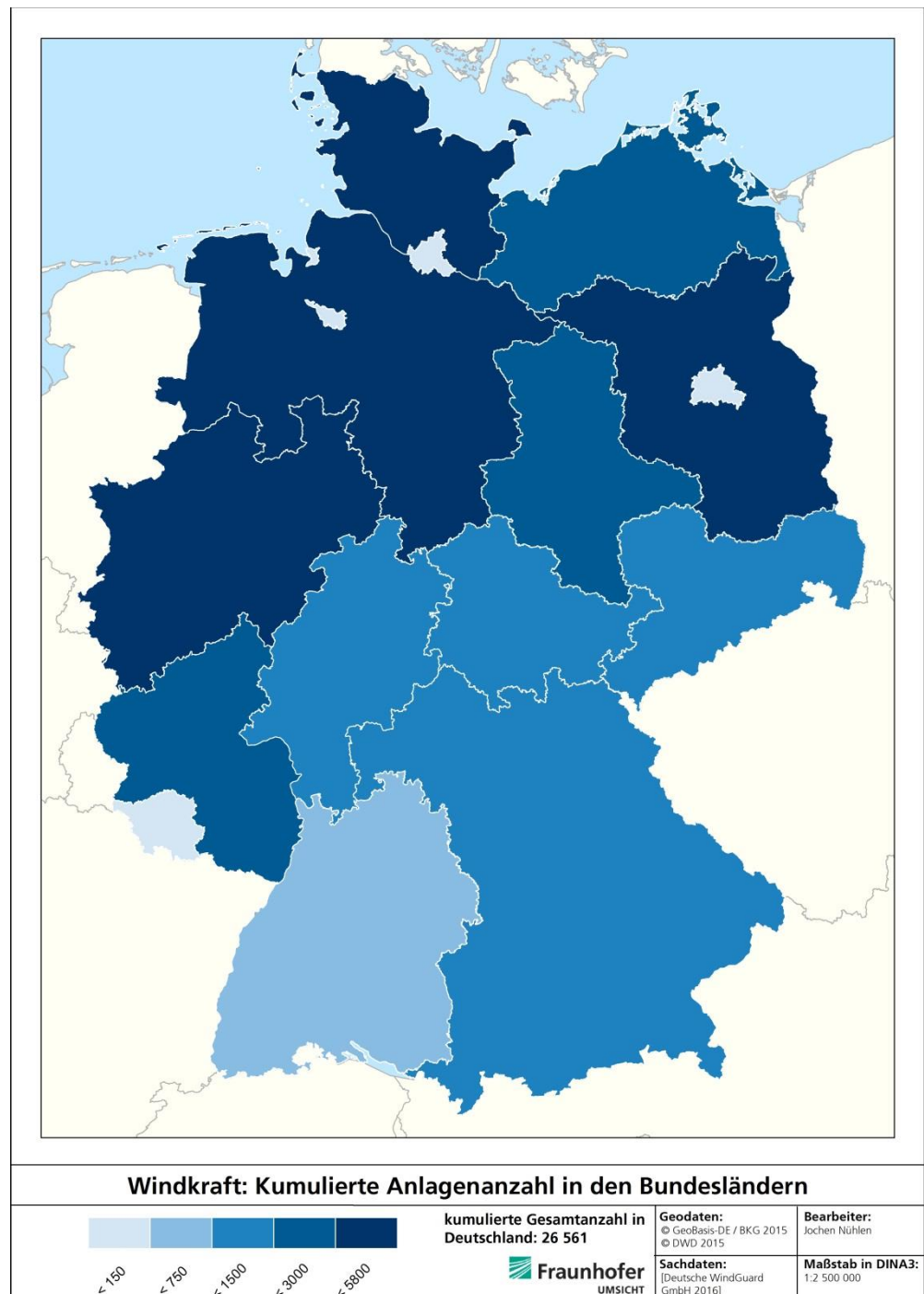
Mitte 2016 waren in Deutschland insgesamt 26 561 Windenergieanlagen (WEA) mit einer Gesamtleistung von 43 543 MW in Betrieb. Davon wurden von Anfang bis Mitte 2016 726 WEA neu installiert [Lüers-2016a]. Die erste große Bauphase ist um den Jahrtausendwechsel zu verzeichnen. Die durchschnittliche Lebensdauer einer Windenergieanlage wird mit 20 Jahren angegeben, so dass nun die erste große Phase des Rückbaus ansteht.

Bild 6-1:
Anzahl der Windenergieanlagen (WEA) in Deutschland, eigene Darstellung, Daten [Windguard-2015]



Die Möglichkeiten zum Ausbau von großen WEA sind gegenwärtig an Land fast aufgebraucht, weil die besonders windergiebigsten Standorte besetzt sind. Der Neubau ist daher vielerorts mit einem Rückbau von Altanlagen verbunden. Die Menge der installierten Windenergieanlagen ist durch unterschiedliche naturräumliche und politische Faktoren je nach Bundesland verschieden. Vor dem Hintergrund einer Circular Economy ist damit zu beachten, dass das Material entsprechend in unterschiedlicher regionaler Dichte im anthropogenen Lager vorhanden ist.

Bild 6-2:
Verteilung der WEA in
Deutschland, eigene
Darstellung, Daten
nach [Lüers-2016b]



Die große Anzahl der Windenergieanlagen in Deutschland sowie die gezeigte Altersstruktur lässt daher zunehmend auch das Thema Anlagenrückbau und damit einhergehend geeignete Verwertungs- und Entsorgungskonzepte im Rahmen einer Circular Economy in den Fokus rücken. Die bereits installierte Leistung bedeutet Zukunftssicherheit im Bereich der Windenergiezulieferer, Industrie- und Servicedienstleister. Durch den in Deutschland hohen Bestand an Anlagen, die mittlerweile am Ende des geplanten Lebenszyklus angelangt sind und die knappe Flächenverfügbarkeit, ist das theoretische Repowering-

Potenzial als hoch anzusehen und damit auch der theoretische Anfall von EoL-Rotorblattmaterial.

Mit dem Begriff des Repowering wird in der Windenergiebranche im Allgemeinen der Ersatz älterer WEA durch neue, effizientere Anlagen definiert [BWE-2012]. Eine Studie der Deutschen Physikalischen Gesellschaft (DPG) aus dem Jahr 2010 sieht im Repowering eine der wesentlichen Aktivitäten zur Steigerung der Gesamtleistung, insbesondere im Binnenland [AKE-2010]. Das übergeordnete Ziel eines Anlagenrückbaus ist das Erreichen des Repowering-Effektes. Der Repowering-Effekt wird durch eine Leistungssteigerung um mindestens das Zweifache der ursprünglich installierten Leistung, einen höheren Stromertrag durch die bessere Ausnutzung der lokalen Windressourcen und eine verbesserte Netzintegration definiert [VEE Sachsen-2011]. Mit dem Austausch der Altanlagen findet meist auch eine erhebliche Verringerung von Schallimmissionen und Schattenwurf statt [BWE-2015]. Die Besonderheit bei vielen Repowering-Projekten ist die Berücksichtigung bereits vorhandener Standortinfrastruktur im Bereich von Netz und Verkehrsanbindung [VEE Sachsen-2011]. Das Repowering bietet somit den Vorteil der Entlastung des Landschaftsbildes bei einer gleichzeitigen Erhöhung des Ertragspotenzials. Zudem ergibt sich gleichzeitig ein hohes Potenzial an Energie- und Ressourceneffizienz, aus dem sich mehrere ökonomische und ökologische Vorteile generieren lassen. Neben dem Effizienzgewinn und der Entlastung des Landschaftsbildes ist auch der ökonomische Vorteil für Anlagenbauer und Projektierer gegeben, da eine bereits genutzte Fläche nochmals für die Windenergie zur Verfügung steht. So wurden von Anfang bis Mitte 2016 147 Anlagen zurückgebaut und 106 Altanlagen durch neue Anlagen ersetzt [Lüers-2016a].

Im Repowering ist jedoch auch ein mögliches Recycling- und Rohstoffeffizienzpotenzial vorhanden. Der Gedanke einer Circular Economy und damit der Ansatz eines stofflichen Recyclings der in alten WEA verbauten Komponenten oder gebundenen Rohstoffe, spielt jedoch bisher eher eine untergeordnete Rolle in der branchenspezifischen Forschung als auch in der Abfallwirtschaft, da der Großteil der in einer WEA verbauten Materialien (Beton, Stahl) in etablierte abfallwirtschaftliche Strukturen fließen kann. Eine relevante Materialgruppe einer WEA im Hinblick auf aktuelle und künftige Recyclingverfahren sind jedoch insbesondere die auf Glasfaser- und Kohlefaserverbundwerkstoffen basierenden Rotorblätter, für die aktuell noch kein Recyclingverfahren gleichwertig zum Ausgangsprodukt existiert [Albers-2016a], [Pehlken-2016].

Der Anfall von EoL-Rotorblattmaterial steht in direktem Zusammenhang mit den Verfahren zum Rückbau und Verbleib sowie Nachnutzung der gesamten Altanlage. Mit dem Erreichen des allgemein angenommenen Endes des Produktlebenszyklus einer WEA von 20 Jahren steht entweder ein Rückbau in Verbindung mit einem Ersatz der Altanlage durch eine Neuanlage (Repowering), ein Weiterbetrieb nach eingehender technischer Überprüfung über die geplante Nutzungsdauer hinaus oder ein Rückbau mit anschließendem Recycling oder sonstiger Verwertung aller Anlagenkomponenten an.

Ist der Weiterbetrieb nicht möglich, werden die meisten Alt-WEA nach dem Rückbau in Deutschland je nach Alter und Zustand überholt und ins Ausland verkauft, um dort meist im Rahmen von Insellösungen weiter betrieben zu

werden [BWE-2015]. Zurzeit existiert in Deutschland ein wachsender Markt für gebrauchte WEA und Anlagenkomponenten wie etwa Generatoren, Frequenzumrichter oder Stahltürme aus durchgeführten Repowering-Vorhaben und dem Anlagenrückbau (vgl. Tabelle 6-1). Dieser Markt ist als Verkäufermarkt einzuschätzen [Kunert-2010]. Bisher ist der tatsächliche Verbleib der demonitierten Anlagen jedoch nicht durch eine übergeordnete amtliche Statistik belegbar [Albers-2016b].

6.1.1 Herstellung, Design, Zusammensetzung und Funktion

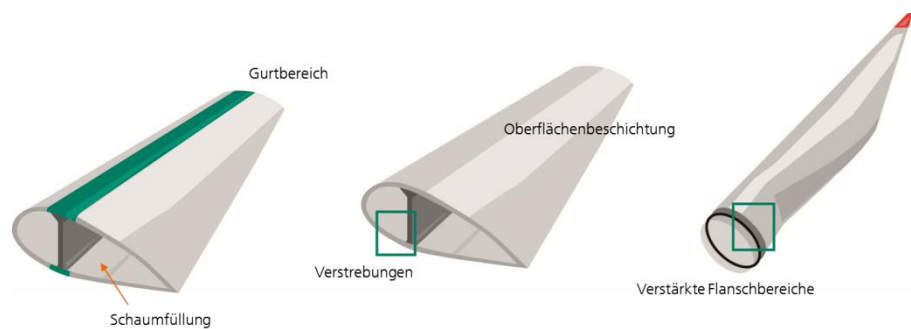
Die Rotorblätter einer Windenergieanlage sind die Komponenten, die durch die Drehungen die Bewegungsenergie des vorbeiströmenden Windes aufnehmen und die Leistung an die Nabe der Anlage weiterleiten [Bade-2005]. Die grundsätzliche Funktion besteht damit darin, die kinetische Energie aus der Ressource Wind auf den Generator zu übertragen. Der Rotor besteht in modernen Anlagen aus drei Rotorblättern und macht gewichtsmäßig nur einen geringen Teil der Gesamtanlagen aus (je nach Anlagentyp und Anlagengröße zwischen 2-3 Gew.-% vgl. [Rohrig-2013], ist aber für rund 25 % der Kosten der Gesamtanlage verantwortlich [Isenburg-2013]).

Der einzelne Rotor besteht in der Regel aus Faserverbundwerkstoffen, bislang wurde hauptsächlich glasfaserverstärkter Kunststoff (GFK) eingesetzt. Werden die Rotorblätter länger, wird zunehmend auch auf den Einsatz kohlefaserverstärkter Kunststoffe (CFK) gesetzt. Zu diesen kommen noch Kunstharze hinzu, die als Matrixmaterial ca. das 1,5-fache Gewicht der Glasfaser ausmachen [Martínez-2009]. Zum Einsatz kommen bestimmte, je nach Verarbeitungsverfahren abgestimmte Harz-Härter-Systeme [Bittmann-2016]. Die folgende Auflistung zeigt die im Rotorblattbau verwendeten Materialien [Woidasky-2013a], dabei ist zu berücksichtigen, dass jeder Rotorblatthersteller unterschiedliche Materialien in unterschiedlichen Mengen (Anteilen) verwendet:

- Harz (Epoxid- und Polyesterharz, Silikone < 30 bis 50 Gew.-%)
- Balsaholz (z. B. für Verstreben) < 5 Gew.-%
- Fasern (Glasfasern, Carbonfasern) (Gurtbereich 35 bis 75 Gew.-%)
- PU-Hartschaum (< 5 Gew.-%)
- Fe- und NE-Metalle (Stahl im Flanschbereich sowie Kupfer und Aluminium als Blitzschutz < 5 Gew.-%)
- Lacke (< 5 Gew.-%) z. B. zur Oberflächenbeschichtung)

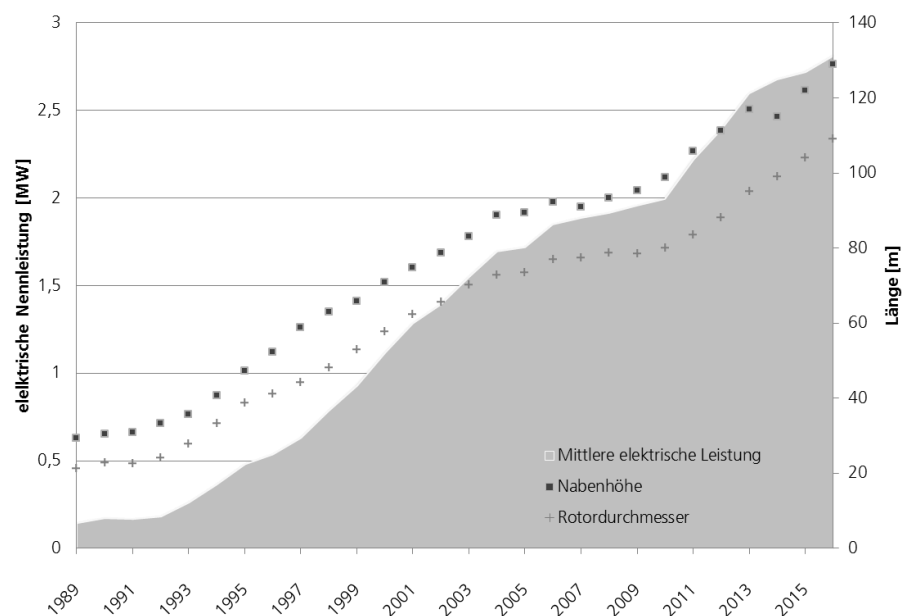
Nachfolgende Abbildung zeigt den schematischen Aufbau eines Rotorblatts.

Bild 6-3:
Idealisierter Aufbau
eines modernen Rotor-
blatts, eigene Darstel-
lung



Mit zunehmender Anlagenentwicklung und Erhöhung der Leistung einer Windenergieanlage wächst auch die Rotorblattlänge. Demnach ist je nach Alter der Windenergieanlage mit unterschiedlichen EoL-Materialmengen zu rechnen.

Bild 6-4:
Entwicklung von Lei-
stung, mittlerem Rotor-
durchmesser und
Nabenhöhe, eigene
Darstellung nach [Nüh-
len-2012], Daten nach
[Windmonitor-2016]



Rotorblätter von Windenergieanlagen der 2-3 MW Klasse wiegen zwischen 6 und 10 Tonnen pro Blatt je nach Rotordurchmesser und Anlagentyp. Ein Rotorblatt von 40 m Länge wird etwa mit 8,4 Tonnen beziffert [Beauson-2014]. Bei Anlagen mit Rotordurchmessern von 150 m und einer entsprechenden Blattlänge von 75 Metern wiegen Rotorblätter aus GFK und Balsaholz bereits 25 Tonnen [Siemens-2012].

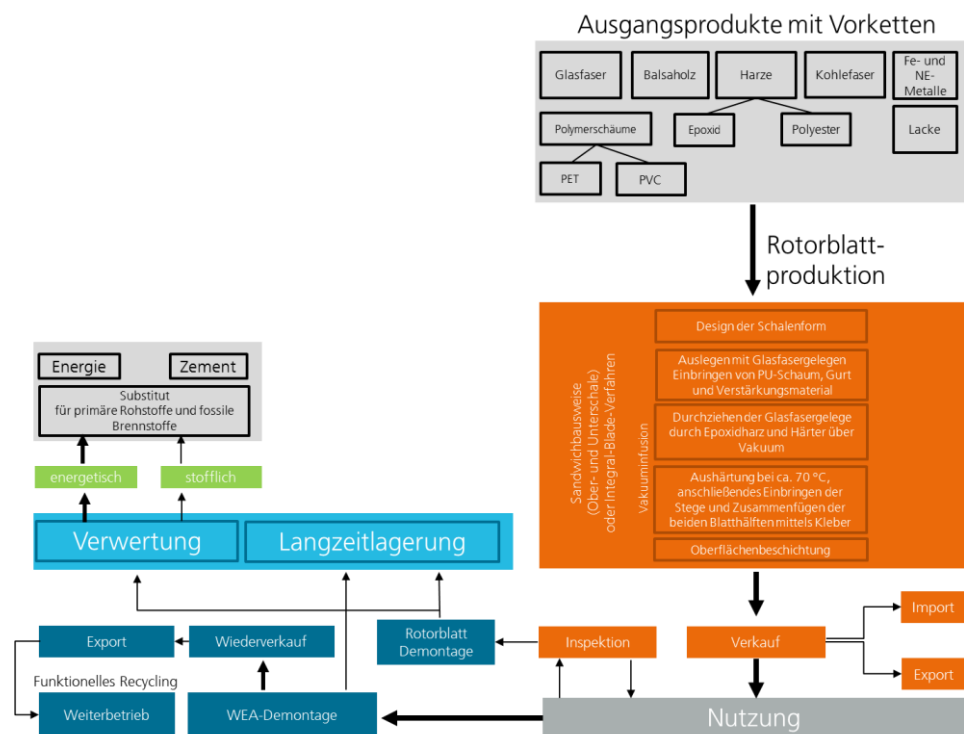
Dabei ist jedoch zu beachten, dass in diesem Fall eine spezielle Herstellungsweise ohne den Einsatz von Nahtstellen und entsprechenden Klebern notwendig ist. Ohne diesen Einsatz wäre das Rotorblatt fast 30 Tonnen schwer. Zwar lassen sich Rotorblätter somit durch Weiterentwicklung der Fertigungsverfahren und intelligenten Materialeinsatz im Verhältnis mit geringeren Gewichten herstellen als vor einigen Jahren, jedoch wird die Gewichtseinsparung auch oft durch den Einsatz von CFK statt GFK in bestimmten Blattbereichen erreicht. Dies stellt im Hinblick auf die Recyclingeigenschaften des gesamten Rotorblatts keine Verbesserung dar. Der Vergleich von Leistung zu Gewicht der Rotorblätter ist nur bedingt möglich, da identische Rotorblätter ebenso an 2 MW-

Anlagen als auch an 3-MW Anlagen verbaut werden (vgl. z. B. Enercon E-82 E2 und E4).

Betrachtet man ein Rotorblatt mit einer Länge von 39 Metern und einem Gewicht von 6,5 Tonnen pro Blatt, sind in einem Gesamtrotor 11,7 Tonnen Harz und 7,8 Tonnen Glasfaser verbaut. Die angegebene Energie zur Herstellung des Harzes beläuft sich dabei auf 20,15 MWh, die zur Herstellung der Glasfaser auf 12 MWh [Martínez-2015]. Andere LCA-Daten gehen bei ähnlicher Rotorblattlänge von einem Gesamtgewicht von 24,5 Tonnen mit Glasfaser und Harzanteilen von 21,5 Tonnen aus, bei einem Energieeinsatz von 25,32 MWh [Vargas-2015]. Weitere Mengenangaben finden sich in [Haapala-2014] und [Guezuraga-2012]. Je nach Anlagentyp und Hersteller sind somit unterschiedliche Materialmengen zu erwarten.

Nachfolgend ist der Lebenszyklus eines Rotorblatts beginnend bei den verschiedenen Ausgangsprodukte über die Produktion sowie die verschiedenen Optionen der Verwertung am Ende des Lebenszyklus schematisch dargestellt. Die Pfeildicke symbolisiert dabei qualitativ den Hauptpfad über den Lebenszyklus.

Bild 6-5:
Lebenszyklus von
Rotorblättern



Nachfolgend werden die einzelnen Schritte vor dem Hintergrund der Herausforderungen und den Grenzen einer Circular Economy weiter diskutiert.

6.1.2 Rechtliche und nutzerseitige Anforderungen an die Produktperformance

Die Anforderungen an die Produktperformance sind zusammengefasst im DNVGL-ST-0376-Standard für Rotorblätter, der im Dezember 2015 zuletzt aktualisiert wurde [DNVGL-2015]. Die Zertifizierungen sind marktgetrieben und nicht durch den Gesetzgeber vorgegeben. Im Bereich der Sicherheitsanforderungen für die Gesamtanlage gilt die DIN EN 61400-1:2011-08, der in Deutschland die Richtlinie für Windenergieanlagen des Deutschen Instituts für Bautechnik angepasst ist [DIBt-2012].

Um den Anforderungen im Betrieb entsprechen zu können, benötigen Rotorblätter eine hohe Festigkeit in Verbindung mit ausreichender Flexibilität bei geringem Gewicht. Sie müssen dabei den mechanischen Eigenschaften wie Zug-, Druck- und Biegefestigkeit bei gleichzeitiger Ermüdungsresistenz gegenüber starken Lastwechseln standhalten. Dies ist aus zwei Gründen wichtig: Das Gewicht der Rotorblätter ist mitentscheidend für die Konstruktion des gesamten Unterbaus aus Betonfundament und Turm der WEA, was wiederum direkt mit den Kosten korreliert. Gleichzeitig wird durch ein geringeres Gewicht auch die Transportierbarkeit erleichtert.

Des Weiteren wird eine hohe Lebensdauer bei minimalen Unterhaltungskosten erwartet. Es sind i.d.R. bei alten Anlagen Wartungsintervalle von zwei Jahren vorgesehen, die auf vier Jahre bei modernen Anlagen ausgedehnt werden können, wenn einmal pro Jahr eine Überwachung und Wartung durch die Herstellerfirma durchgeführt werden kann [Pehlken-2016], [BWE-2004], [Bergmann-2015], [Weller-2016].

Darüber hinaus wird in der Richtlinie für Windenergieanlagen vom Deutschen Institut für Bautechnik gefordert, dass die Rotorblätter den aerodynamischen Anforderungen genügen müssen. Das verwendete Material darf ebenfalls nicht zu Fäulnis- oder Rostbildung neigen und soll nach Möglichkeit elektrisch isolierend sein. Dies umfasst insgesamt die Stabilität gegenüber ultravioletter (UV)-Strahlung, Kälte, Wärme, Hagel, Regen- und Sanderosion, Salzwasser sowie Fremdkörpern [DIBt-2012]. Die Beständigkeit gegenüber Witterungseinflüssen wird hauptsächlich über die spätere Beschichtung und Lackierung erreicht, die zudem die Lichtreflexion der Rotorblätter verhindert [DIBt-2012].

6.1.3 Produktions- und Abfallmengen

In Europa wurde 2015 etwa eine Million Tonnen GFK-Material⁷ produziert. Etwa ein Drittel entfielen dabei auf die Kategorie der Bauteilfertigung, unter der die Herstellung von Rotorblättern für Windenergieanlagen statistisch erfasst wird [Witten-2016]. Zieht man in Zukunft noch den Anteil an CFK-Material hinzu, so wurden 2014 etwa 74 000 Tonnen CF-Material und damit 14 % des globalen CF-Bedarfs für Windenergieanlagen genutzt.

⁷ glasfaserverstärkte Kunststoffe mit einer duroplastischen Matrix sowie glasmattenverstärkte Thermoplaste (GMT) und langfaserverstärkte Thermoplaste (LFT)

Der Anfall von EoL-Rotorblattmaterial resultiert zum einen aus Rückbaumaßnahmen der Gesamtanlage am Ende des Lebenszyklus oder aus dem Ersatz von beschädigten einzelnen Rotorblättern innerhalb des ersten oder zweiten Lebenszyklus der Anlage. Die Materialmenge aus Rückbaumaßnahmen macht dabei jedoch den größten Anteil aus.

Die dargestellten Installationszahlen in Kapitel 6.1. legen einen entsprechend zeitversetzten, regionalen und zeitlich schwankenden Anfall von Rotorblattmaterial nahe. Dabei stellt sich nicht die Frage, ob Material zur Verwertung anstehen wird, sondern wann, wo und in welcher Menge.

Die Entwicklung des Mengenanfalls von EoL-Rotorblattmaterial hängt dabei von verschiedenen Faktoren ab, da der Abbau einer Anlage genau wie der Aufbau einer Anlage standort- und anlagenspezifischen Gegebenheiten unterliegt. Der aktuelle Materialanfall als auch dessen zukünftige Entwicklung unterliegen externen Faktoren, die nur bedingt allgemeingültig prognostizierbar sind. Folgende Annahmen sind von übergeordneter Bedeutung für eine Voraussage der Mengenentwicklung und entscheiden über den Zeitpunkt eines Rückbaus:

- Betriebswirtschaftliche Gesamtsituation des jeweiligen Anlagenbetriebs
- Anlagenspezifischer Zustand der Technologie
- Repowering-Bedarf durch Flächenmangel, um Generationswechsel der Anlagen voranzutreiben und mehr Energie pro Fläche zu ernten
- Bisherige Lebensdauer
- Möglichkeit des Weiterbetriebs einer Anlage über die üblich angesetzte Lebensdauer von 20 Jahren und über den Zeitraum einer EEG-Vergütung hinaus
- Möglichkeit der zerstörungsfreien Demontage und Weiterverkauf als »Gebrauchsanlage« ins Ausland, Nachfrage nach Altanlagen
- Preiserlös von Materialien aus dem Rückbau und Entsorgungskosten für nicht mehr weiter- oder wiederverwendbare Komponenten

Die Mengenabschätzung basiert hauptsächlich auf der Annahme der verbauten Materialien in Abhängigkeit vom jeweiligen Rotordurchmesser. Wie bereits in Kapitel 6.1. dargestellt, gehen die Annahmen hier auseinander. Ausgehend von der Annahme, dass pro Kilowatt Leistung zwischen von 12-15 kg eingesetzt werden [EWEA-2013], können Abschätzungen der zu erwarteten Kompositmaterialien erstellt werden. Bestehende Abschätzungen gehen davon aus, dass etwa für die Jahre 2012 bis 2016 jährlich etwa 3 000 Tonnen Verbundwerkstoffe (maßgeblich GFK) anfallen müssten [Albers-2016b]. Dagegen steht die Zahl von rund 800 Tonnen verwerteter Rotorblätter in Zementwerken zwischen Mitte 2010 und Anfang 2012 [Niederhausen-2014]. Mit den in Zukunft zu erwartenden Altanlagen mit größeren Rotordurchmessern sind weiter steigende Materialmengen zu erwarten. Wie hoch der Exportanteil oder der Anteil der Anlagen ist, die final rückgebaut und einer Verwertung zugeführt werden, ist jedoch aktuell nicht vorhersehbar.

Auch wenn die Abschätzung der Mengen zudem nur auf statischen Sekundärdaten basiert und zudem durch die unterschiedlichen Anlagentypen, die zusätzlich regionalen Unterschieden unterliegen, bestimmt wird, können Größenordnungen zu generellen Kapazitäten angenommen werden. Demnach steht die große Rückbauwelle an Altanlagen noch bevor.

Bild 6-6:
Erwartete deutschlandweit zu entsorgende Windenergieanlagen, eigene Hochrechnung auf Datenbasis [Windguard-2015]

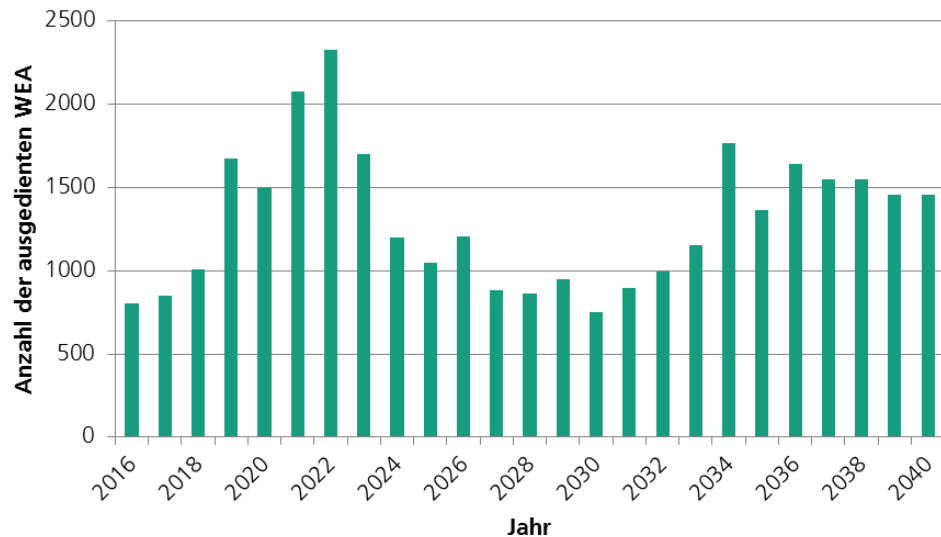
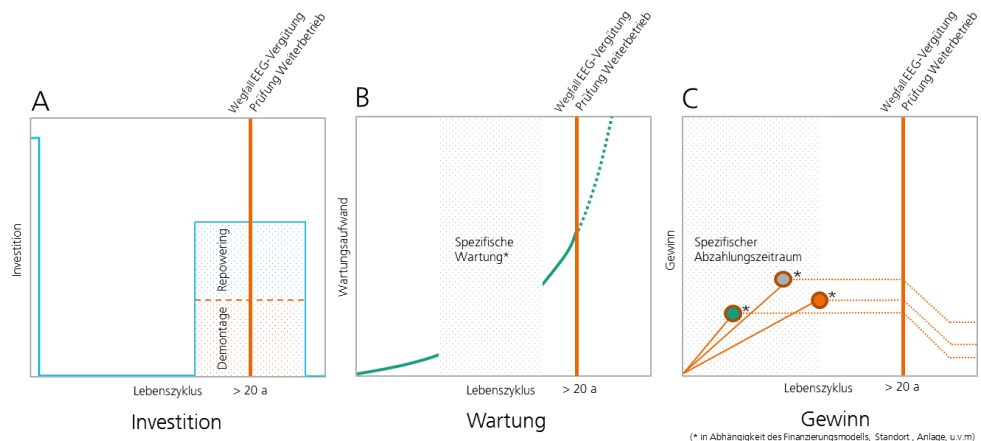


Bild 6-6 stellt qualitativ dar, welche Faktoren im Hinblick auf den Anfall von Rotorblättern eine grundsätzliche Rolle spielen. Am Anfang stehen hohe Investitionskosten und die Gewinnphase beginnt, wenn die Anlage sich amortisiert hat. Geschmälert wird der Gewinn durch Wartungs- und Reparaturkosten. Nach Ablauf von 20 Jahren entfällt die EEG-Zulage, was ebenfalls den Gewinn reduziert. Solange die entsprechende Anlage gewinnträchtig ist, werden die Rotorblätter dem Recyclingmarkt jedoch nur stark verzögert aus dem anthropogenen Lager zur Verfügung stehen. Falls nach Ablauf der EEG-Zulage jedoch kein wirtschaftlicher Betrieb möglich ist, werden größere Rückbauwellen zu erwarten sein, um die bestehenden Standorte mit einem Generationswechsel der Anlagen wieder lukrativ zu betreiben.

Bild 6-7:
Qualitative Darstellung von Einflussgrößen auf den Anfall von EoL-Rotorblattmaterial, eigene Darstellung



6.1.4 Aktuelle Zielvorgaben für die Verwertung

Den Autoren ist zum Stand 2016 keine spezifische Zielvorgabe zur Verwertung von Rotorblättern bekannt. Der gesetzlichen Rahmen für die Abfallbewirtschaftung von Rotorblättern findet sich im Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) 2012 in §6 Abfallhierarchie wieder. Wenn eine Vermeidung nicht möglich ist, besagt die dort vorgesehene Reihenfolge: Vorbereitung zur Wiederverwendung – Recycling – Sonstige Verwertung – Beseitigung [BMJV-2012]. Auch die unter § 23 genannte Produktverantwortung ist durch den Gesetzgeber im Fall von Windenergieanlagen als auch im Fall der Rotorblätter bisher nicht wahrgenommen worden.

6.1.5 Verwertungswege und ihre Sekundärprodukte

Nach dem heutigen Stand existieren keine industriellen Verfahren für ein hochwertiges Recycling von Rotorblättern vgl. [Pehlken-2016], [Albers-2016b]. Obwohl das Material aufgrund seines ursprünglichen Verwendungszwecks eine sehr hohe Resistenz gegenüber Auslaugung und Zersetzbarkeit hat, ist seit Juni 2005 das Deponieren großer faserverstärkter Kunststoffbauteile aufgrund der hohen Organikanteile durch die damalige Technische Anleitung Siedlungsabfall (TASi) und deren ergänzende Abfallablagerungsverordnung (AbfAbIV) untersagt und ist seit 2009 in der geltenden Deponieverordnung (DepV) bestätigt. Daher steht für diese Materialien die thermische Verwertung im Vordergrund [VDI-2014]. Dabei ist zu beachten, dass die energetische Verwertung durch den Wegfall der Heizwertklausel der stofflichen nicht mehr gleichgesetzt ist.

Ein Recycling der Glasfaser- sowie Harzbestandteile ist in Bezug auf Rotorblätter nicht möglich, da bislang keine Möglichkeit besteht, die Rohstoffe separat wiederzugewinnen und einer neuen Nutzungsphase als Rotorblatt zuzuführen. Durch einen Verbrennungs- oder Mahlprozess aus der Matrix zurückgewonnene Glasfasern sind durch deutlich geringere Faserlängen gekennzeichnet und sind dadurch als weniger wertiger zu betrachten als das Ausgangsmaterial. Bei Mahlprozessen ist zusätzlich noch das große Gesundheitsrisiko durch Glasfaserstaub zu beachten. Eine Wiederverwendung der aus der Matrix zurückgewonnenen minderwertigeren Glasfasern findet bereits in geringem Umfang statt: Sie werden beispielsweise in Dämmmatten eingesetzt [ReFibre ApS-2004].

Die Wiederverwendung der Rotorblätter zu anderen Verwendungszwecken ist nur eingeschränkt möglich, da es sich zum einen um sehr große Bauteile handelt, die eine aufwändige und damit teure Logistik bedingen. Darüber hinaus sind Rotorblätter an den jeweiligen Anlagentyp angepasst, so dass ein Einsatz an neuen Windenergieanlagen meist nicht in Frage kommt. Eine Wiederverwendung von entsprechend angepassten Bauteilen auf Kinderspielplätzen oder in Form von Sitzbänken ist jedoch denkbar [Superuse-2016], der Markt ist aber eher als Nische zu betrachten. Eine Wiederverwertung der eingesetzten Harze ist zurzeit nicht möglich, hier findet eine energetische Nutzung statt.

Nach Kapitel 6.1.4. stehen für Rotorblätter in der Abfallhierarchie die Stufen 1 bis 4 zur Verfügung. Nach einem Rückbau – sowohl der Gesamtanlage als auch im Zuge eines separaten Austauschs von Rotorblättern – existieren letztlich vier

Verwertungspfade für ausgediente Windenergieanlagen und die damit einhergehenden Rotorblätter. In abnehmender Reihenfolge der aktuellen Relevanz werden die Pfade nachfolgend kurz vorgestellt:

Vermeidung

Ob der Rückbau oder der Weiterbetrieb die ökonomisch und ökologisch sinnvolle Variante darstellen, ist standortabhängig und muss im Einzelfall für jede Anlage entschieden werden [Zimmermann-2011]. Diese Einschränkung gilt auch, wenn der Rückbau im Rahmen eines Repowerings durchgeführt wird und ist nicht zu verallgemeinern. Deutschland ist in nach DIN 1055-4:2005-3 in vier unterschiedliche Windlastzonen eingeteilt. Diese beziffern im Wesentlichen auf Basis der Windgeschwindigkeit sowie der topografischen Gegebenheiten die Last, der die Windenergieanlagen im Verlauf des Lebenszyklus am konkreten Standort ausgesetzt sind (dabei ist Zone 4 die Kategorie mit den höchsten Anforderungen). Falls Anlagen für Windlastzone 3 zugelassen sind, jedoch in Windlastzone 2 oder 1 betrieben werden, ist je nach Windlastzone sowie tatsächlichen Betriebsstunden somit ggf. aus technischer Sicht Potenzial zum Weiterbetrieb gegeben. Generell gilt jedoch, dass eine weitere Nutzung der Anlagenteile bis hin zur kompletten WEA nach einer entsprechenden Generalüberholung und je nach Verschleißgrad prinzipiell möglich ist [BWE-2015]. Da für einen Weiterbetrieb das Erbringen eines Nachweises der technischen Sicherheit durch den Betreiber notwendig ist, sind Vorgaben für den Weiterbetrieb in einem globalen Standard (DNVGL-ST-0262) und dazugehörigen Servicespezifikationen (DNVGL-SE-0263) des DNV GL aus dem März 2016 zusammengefasst [DNVGL-2016].

Vorbereitung zur Wiederverwendung

Im Falle eines Anlagenrückbaus existieren unterschiedliche Rückbauverfahren, die je nach spezifischen Standortgegebenheiten und technischer Empfehlung Anwendung finden. Dazu zählt die stückweise Demontage der einzelnen Anlagenkomponenten am Anlagenstandort entsprechend einem Verfahren des einstigen Anlagenaufbaus mittels Schwerlastkran und späterer Demontage einzelner Komponenten innerhalb der Gondel. Dieses Demontageverfahren erlaubt einen zerstörungsfreien Abbau der Komponenten, der im Einzelfall somit ein Re-Manufacturing mit anschließendem Weiterverkauf erlaubt. Es ist jedoch entsprechend zeit- und kostenaufwändig sowie wetterabhängig. Falls das Rotorblatt noch in einem technisch guten Zustand ist und eine zweite Nutzungsphase möglich scheint, wird das Blatt am Stück abtransportiert und bei entsprechender räumlicher Kapazität entweder bis zum erneuten Einsatz oder zur endgültigen thermischen oder stofflichen Entsorgung gelagert. Dies ist jedoch aufgrund der Ausmaße des Blatts mit hohen Logistikkosten verbunden und muss im Einzelfall unter ökonomischen Gesichtspunkten abgewägt werden.

Verkauf, Demontage und anschließender Wiederaufbau

Wenn WEA abgebaut werden, ist aktuell einer der häufigsten Wege der Wiedernutzung. Dazu werden die Anlagen fachmännisch zerlegt und an andere Standorte, meist im osteuropäischen Raum, verkauft, dort wieder aufgebaut und so einer zweiten Nutzungsperiode zugeführt. Hierzu existieren Datenbanken, in denen Interessenten sich informieren können, welche Anlagen (Modell,

Größe, Alter, Leistung, Zustand) zu welchem Preis erworben werden können (vgl. Tabelle 6-1).

Die Langzeitlagerung von Rotorblättern nach einer Demontage am Ende des Lebenszyklus ist eher Regel statt Ausnahme. Auch die Nachnutzung von generalüberholten Altanlagen findet oft in Ländermärkten mit einer einfachen Struktur der Entsorgungsinfrastruktur statt, so dass ein Recycling am Ende der zweiten Lebensphase nicht vorausgesetzt werden kann.

Tabelle 6-1: Auswahl von Marktplätzen für gebrauchte WEA und Komponenten, verändert nach [Nühlen-2012]

Anbieter	Kontakt
Deutsche Windtechnik AG	http://www.windturbinescout.com/
BlumSolar	http://www.blumsolar.de/
Wind-Westerwald	http://www.wind-westerwald.de/
Bs green GmbH	http://www.bs-green.com/home
P&J Windpower ApS	http://www.pjwindpower.de/
wind-turbine.com GmbH	https://wind-turbine.com/
MWPS – MyWindPowerSystem Ltd.	http://www.mywindpowersystem.com/

Ein Beispiel für die Rückbaukosten ist nachfolgend dargestellt. Die Entsorgung des GFK-Materials ist heute noch ein wesentlicher Kostenfaktor.

Tabelle 6-2: Exemplarische Rückbaukosten Windenergieanlage [Nordex-2011]

Posten	Maßnahmen	Mengen	Preis/ Einheit [€]	Kosten [€]	Erlöse [€]
Rotorblätter Maschinenhaus	Entsorgung GFK	33,5 t	400	13 400	
Maschinenhaus	Erlöse Stahl	104,0 t	-200		-20 800
Rotornabe	Erlöse Kupfer	1,0 t	-1 500		-1 500
	Erlöse Elektro- schrott	11,5 t	-100		-1 200
Stahlrohrturm 120 m	Erlöse Stahl- turm	364,0 t	-200		-72 800
	Erlöse Alumi- nium	0,8 t	-700		-600
Schaltschränke Schaltanlage	Erlöse Elektro- schrott	13,0 t	-100		-1 300
Transformator Verkabelung/ Erdkabel	Erlöse Kupfer	6,7 t	-1 500		-10 100
Sonderabfall- stoffe	Entsorgung	< 2,2 t	0,36 *	800	
Personalkosten	Demontage	4 d	4 000	16 000	
Krankkosten	Inkl. Auf- und Abbau	4 d		60 000	
	*Mittelwert aus den Einzelkosten der unterschiedl. Stoffe			90 200	-108 300
Fundament	Abriss Transport Entsorgung Beton	665 m³	50	33 300	
	Erlöse Be- wehrung	75 t	-100		-7 500
Kranstellflä- chen	Rückbau Entsorgung	875 m³	15	13 100	
Effektive Rückbaukosten					20 800

Demontage und anschließende Lagerung

Falls eine Weiternutzung unter betriebswirtschaftlichen Gründen nicht rentabel ist, wird das EoL-Rotorblattmaterial on-site mittels Bandsägen oder alternativen mechanischen Zerkleinerungsverfahren auf transportfähige Stückmaße gebracht und in Containern sortenrein abtransportiert. Das Zerkleinern ermöglicht den anschließenden Transport mit Standard-Lkw zur Verwertung ohne logistische Herausforderungen. Bei der Zerkleinerung ist der Aspekt der Arbeitssicherheit sehr schwerwiegend, da es bei diesem Vorgang zu extremen Staubeentwicklungen kommt, die eingedämmt werden müssen.

Stoffliche und thermische Verwertung in der Zementindustrie

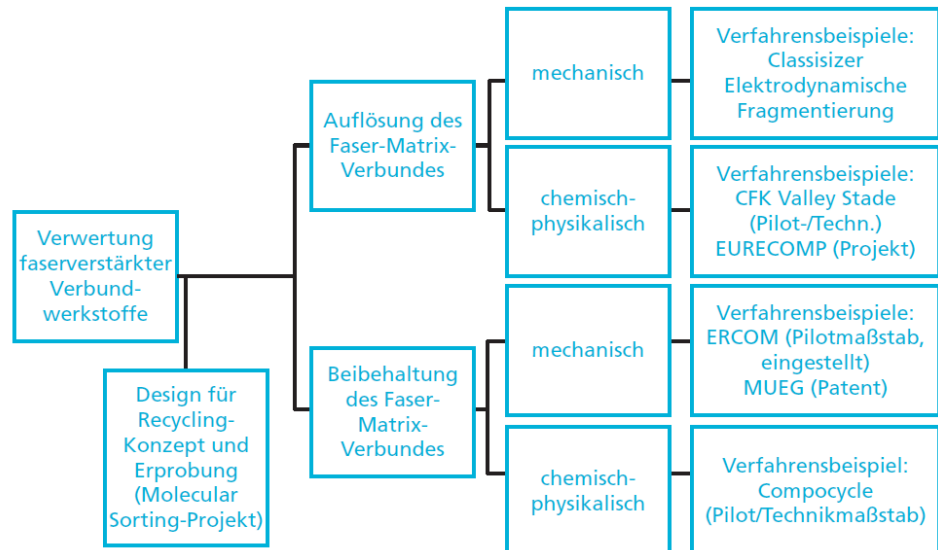
Dem Verfahren des rückwärtsgerichteten stückweisen Rückbaus von Einzelkomponenten steht das Verfahren einer kontrollierten Sprengung des Turmes am Turmfuß gegenüber, oder auch das »Fällen«. Beide Verfahren haben den Sturz der gesamten Windenergieanlage in eine zuvor definierte Richtung zur Folge [Grimble-2013]. Der Turm wird inklusive Gondel und Blättern mithilfe von Zugseilen umgezogen, wenn der Standort es ermöglicht. Zuvor werden alle Betriebsflüssigkeiten abgelassen und in Einzelfällen Rotorblätter und Gondel mit speziellen Textilien überzogen, um ein unkontrolliertes Umherfliegen von Trümmerteilen zu verhindern. Nachfolgend werden die durch den Sturz endgültig zerstörten Anlagentrümmer analog zum oben beschriebenen Verfahren des stückweisen Rückbaus weiter in ihre jeweiligen Einzelteile und Materialfraktionen zerlegt und abtransportiert. Die Zerkleinerung der Blätter kann entweder in Form einer Sprengung vonstattengehen oder auch durch Zerteilen mittels Sägen [Kannenbergs-2012]. Werden die WEA nicht weiterbetrieben, ist der bislang übliche Verwertungsweg der Verbrennung. Dies geschah bis 2009 hauptsächlich in Müllverbrennungsanlagen. Die zuvor mechanisch zerkleinerten Rotorblätter wurden dort der energetischen Verwertung zugeführt.

Ausgediente Rotorblätter werden in industriellem Maßstab seit etwa 2008 in der Zementindustrie genutzt [Geocycle-2016]. Dabei stehen sowohl die Nutzung des Energiegehalts der Harze im Sinne einer thermischen Verwertung als auch die stoffliche Nutzung der Glasfaserbestandteile als Rohstoffersatz im Fokus. Das zuvor von Metallbestandteilen befreite Rotorblatt wird zerkleinert und homogenisiert dem Calcinator zugeführt. Dabei substituieren vorrangig Harz und die sonstigen noch enthaltenen Kunststoffe fossile Brennstoffe (hauptsächlich Braunkohle) bei der thermischen Auftrennung von Kalkstein. Die beim Brennprozess entstandene Asche wird wiederum stofflich genutzt und dem Rohmehl als siliziumhaltiger Korrekturstoff (Sandersatz) zugeführt [Niederhausen-2014]. Dieses patentierte »Co-Processing«-Verfahren stellt derzeit den einzigen nennenswerten Verwertungsweg mit ausgereifter Technik dar [Hinrichs-2013]. Laut Pehlken wird die thermische Beseitigung aber ab 2019 an ihre Grenzen geraten. Wenn die Stückzahlen steigen, wären die vorhandenen Kapazitäten nicht mehr ausreichend [Pehlken-2016].

Exemplarisch sind in folgender Darstellung die grundsätzlichen Möglichkeiten der hochwertigen Verwertung von Verbundwerkstoffen dargestellt. Wirtschaftlich umgesetzt ist davon im großindustriellen Maßstab bislang keines. Dass aktuell kein hochwertiges Recyclingverfahren existiert, liegt auch daran, dass der

Markt für recycelte Glasfasern sowie Kohlefasern noch unklar ist [Albers-2016a].

Bild 6-8:
Verfahrensübersicht zu
Möglichkeiten der
Faserverbundwerk-
stoffverwertung
[Woidasky-2013]

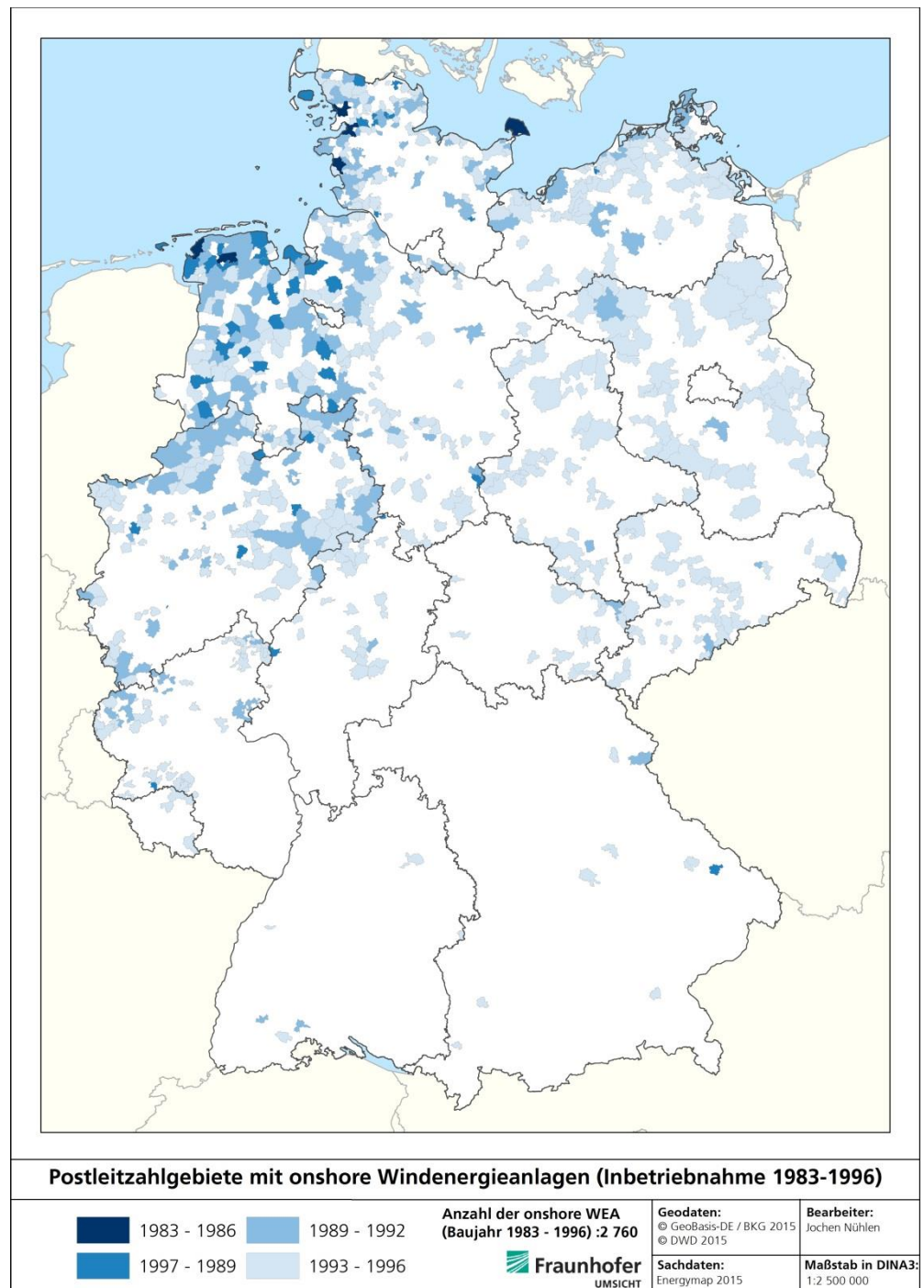


6.1.6 Stoffflüsse und Akteurskonstellationen

Die Stoffflüsse des EoL-Rotorblattmaterials orientieren sich an der regional unterschiedlichen Anlagenzahl sowie der Altersstruktur des Anlagenbestands. Dies legt einen entsprechend zeitversetzten, regional und zeitlich unterschiedlichen Anfall von Material nahe. Die Abschätzung des Mengenanfalls zur Darstellung der Stoffflüsse besitzt somit auch immer eine räumliche Komponente.

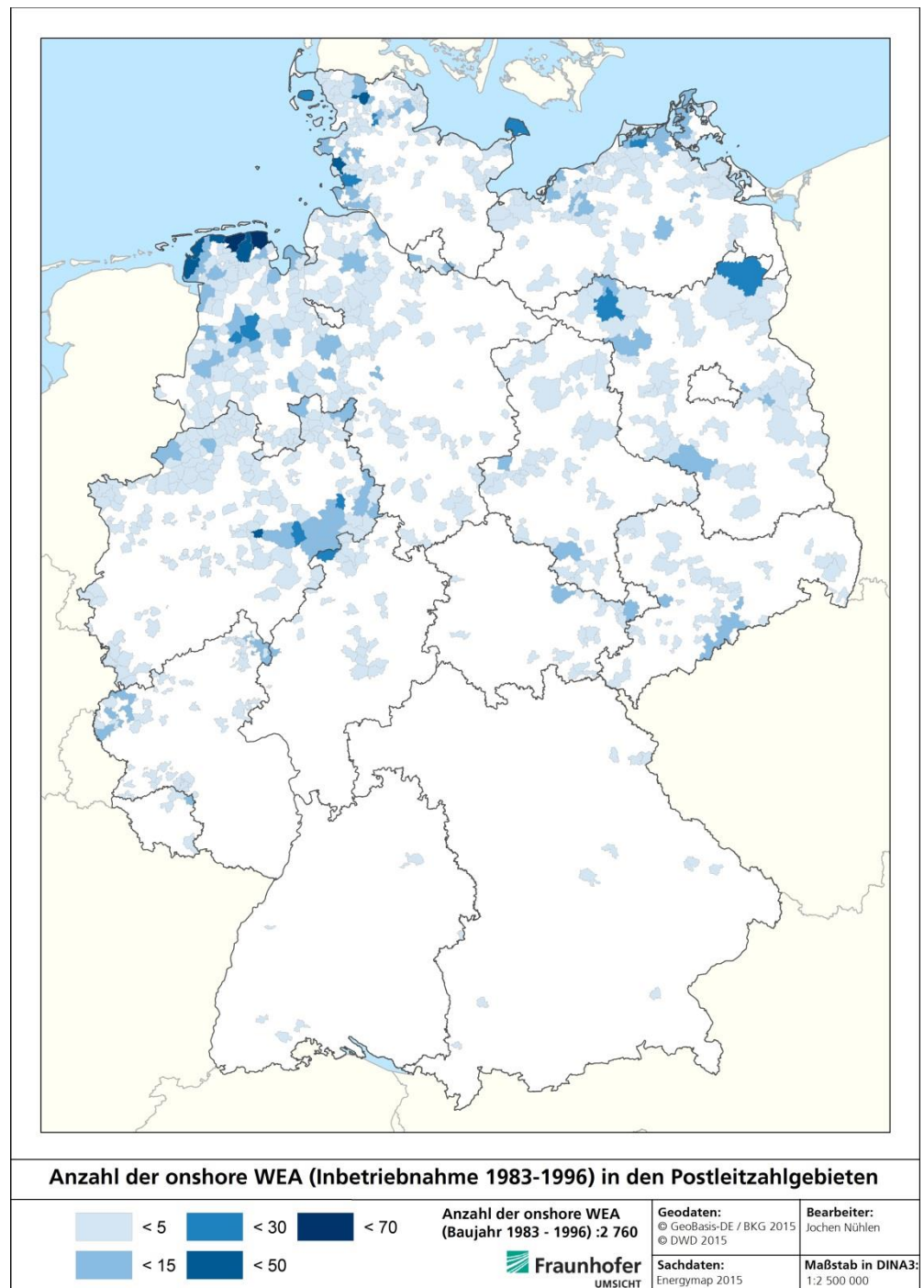
So ist sowohl durch die unterschiedlichen Windverhältnisse als auch durch die naturräumlichen und planungsrechtlichen Gegebenheiten in den einzelnen Bundesländern ein regionaler Unterschied im Hinblick auf den absoluten Anlagenbestand sowie dessen Altersstruktur zu verzeichnen. Einen Überblick stellt die nachfolgende Ansicht der Verteilung der Altersstruktur von Anlagen mit einer Betriebsdauer > 20 Jahren dar. Klar ersichtlich sind die Häufung von Altanlagen im Nordwesten Deutschlands sowie das generelle Nord-Süd-Gefälle.

Bild 6-9:
Altersstruktur der
Anlagen, die das Ende
ihrer Lebenszeit erreicht
haben, eigene Darstel-
lung



Ein ähnliches Bild ergibt sich, wenn man die absolute Anzahl der Windenergieanlagen am Ende des Lebenszyklus über Deutschland hinweg betrachtet. Die nachfolgende Karte zeigt insbesondere eine Häufung in den ostfriesischen und nordfriesischen Küstengebieten, wie auch im Bereich des östlichen Nordrhein-Westfalens.

Bild 6-10:
Gebiete mit Windenergieanlagen am Ende
des Lebenszyklus in
Deutschland, eigene
Darstellung

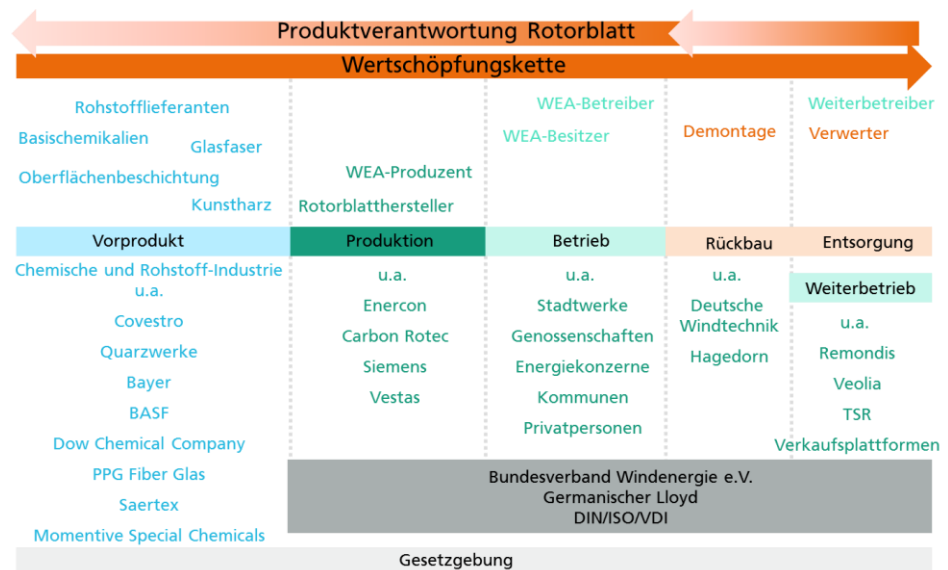


Die Karten zeigen deutlich, dass die anfallenden Mengen regional unterschiedlich ausfallen werden und einer wirtschaftlichen Erfassung der Recyclingströme in möglichen Sammel- und Aufbereitungszentren eine Standortplanung vorausgehen muss. Da mit der Zeit die anfallenden Mengen regional schwanken werden, muss ebenfalls einer entsprechend räumlich flexiblen Aufbereitung Rechnung getragen werden.

Da zurzeit der Export ins Ausland (EU und Nicht-EU) finanziell attraktiver als der Rückbau ist, verlassen viele Anlagen Deutschland und stehen damit möglichen Recyclingprozessen nicht zur Verfügung. Die Menge der für Recyclingprozesse zur Verfügung stehenden Anlagen ist oft noch zu gering für ökonomisch denkbare Recyclingprozesse. Dies wird sich voraussichtlich jedoch ab dem Jahr 2020 ändern [Albers-2009], [Pehlken-2016].

Nachfolgende Darstellung zeigt die verschiedenen Akteure entlang der Wertschöpfungskette sowie der Nutzungsphase eines Rotorblatts.

Bild 6-11:
Zentrale Akteure entlang der Wertschöpfungskette, eigene Darstellung



6.1.7 Umweltwirkungen

Negative Umweltwirkungen durch den Anfall von Rotorblattmaterial entstehen bei unsachgemäßer Zerlegung des Glas- und Kohlefaserverbundmaterials durch gesundheitsgefährdende Staubemissionen. Diese sind jedoch durch entsprechend zerstörungsfreie Demontagemaßnahmen und emissionsvermeidende Zerlegeverfahren sowie Arbeitsschutzmaßnahmen beherrschbar.

Der Ertrag der global 27 000 neu installierten Windenergieanlagen von ca. 100 TWh pro Jahr, steht dem einmaligen Energieaufwand der Produktion gegenüber. Der Energieaufwand für die Herstellung von Rotorblättern für die global im Jahr 2014 installierten 27 000 Windenergieanlagen beträgt etwa 38,5 TWh. Davon entfallen 5,9 TWh auf die Herstellung der Glasfaser und 23,5 TWh auf die Herstellung des Epoxidharzes [Albers-2016a].

Betrachtet man die CO₂-Emissionen einer gesamten Windenergieanlage über den Lebenszyklus, so zeigt sich, dass die Rotorblätter mit 1,2 g CO₂/kWh hinter dem Turm mit 3,15 g CO₂/kWh den zweitgrößten Anteil an den CO₂-Emissionen pro produzierter Kilowattstunde einer Windenergieanlage ausmachen [Ortegon-2013]. Es ist daher wichtig, sich mit dem stofflichen Recycling weiter auseinanderzusetzen, jedoch darf dabei auch nicht die Relation vergessen werden. Betrachtet man zusätzlich die energetische Amortisation, wird das Bild deutlicher. Windenergieanlagen benötigen nach der Installation keinen Einsatz

von fossilen Brennstoffen zur Energiegewinnung und amortisieren sich so energetisch je nach Standortsituation und Anlagentyp nach 2,5 bis 10 Jahren [Niemann-2016], [Brebbia-2007]. Weitere Berechnungen gehen sogar von 3 bis 7 Monaten je nach Standortgegebenheiten für die energetische »pay-back-time« aus [Wagner-2004]. Eine wichtige weitere Größe zur Einordnung der Umweltwirkungen von Windenergieanlagen stellt die EYR (Energy-Yield-Ratio)⁸ dar. Dieser sagt aus, wie oft die zur Herstellung der Anlage aufgebrauchte Energie von dieser während ihres Lebenszyklus erzeugt und zur Verfügung gestellt wird. Betrachtet man die EYR einer 3-MW-Anlage nach Rechnungen von [Brebbia-2007] innerhalb des 20-jährigen Lebenszyklus, so erzeugt die Anlage das 23-Fache der Energie, die zu ihrer Herstellung notwendig war. Wenn die Anlage 30 Jahre betrieben werden sollte, steigt die EYR in diesem Beispiel auf 35. Dass die Standortgegebenheiten einen großen Einfluss darauf haben, zeigen jedoch die Berechnung von [Wagner-2004], nachdem eine Beispielanlage an einem Küstenstandort einen EYR von 64, jedoch an einem Binnenstandort einen EYR von 39 aufweist.

Aktuell existieren keine stofflichen Recyclingverfahren für den Nutzungspfad »Glasfaser zu Glasfaser«. Ein Vergleich der Umweltwirkungen eines Rotorblatts aus Primärmaterial gegenüber einem auf Sekundärmaterial basierenden Rotorblatt ist daher nicht möglich.

6.1.8 Relevanz für Wirtschaft und Beschäftigung

Die Nutzung der Windenergie bringt neben den ökologischen auch viele volkswirtschaftliche Vorteile mit sich. Auf Bundesebene hat der erfolgreiche Aufbau eines Wirtschaftssektors mit Zukunftsorientierung bereits vor Jahren, nicht zuletzt durch die Einführung der EEG-Förderung, begonnen. Mittlerweile gilt Deutschland als Technologieführer; so entstanden im Bereich der Windenergienutzung, der Anlagenplanung sowie der Fertigung von Anlagenbauteilen viele Arbeitsplätze [BWE-2015], [DStGB-2009]. Die vollständige Marktintegration der Technologie schreitet voran, was sich auch an dem im EEG 2014 eingeführten Ausbaukorridor zeigt.

Von den weltweit installierten rund 432 GW installierter Windkraftleistung (Stand Ende 2015), finden sich mit etwa 45 GW mehr als 10 % in Deutschland [GWEC-2015]. Dieser Standortvorteil sichert Arbeitsplätze, da das deutsche Know-how als Exportgut auf dem globalen Windenergiemarkt gilt und einer starken Nachfrage unterworfen ist. So wird im Ausland auch unter anderen politischen Vorzeichen fernab des EEG rentabel Windenergietechnologie betrieben. Von der Entwicklung über die Fertigung bis hin zu industriellen und planerischen Dienstleistungen finden viele Wirtschaftsbereiche Aufgaben rund um die Windenergie, so dass nahezu die gesamte Wertschöpfungskette abgedeckt wird [DStGB-2009].

⁸ Produkt aus jährlichem Netto-Energieoutput in Primärenergieäquivalenten [kWh/a] und Lebenszeit [a], dividiert durch den kumulierten Energiebedarf, der zur Herstellung der Komponenten und Bauteile der Anlage notwendig war [MJ].

Dieser Aspekt berücksichtigt auch die regionale Wirtschaft und steht in direktem Zusammenhang mit der Arbeitsplatzsicherung und -schaffung, besonders in strukturschwachen Regionen. So hat die Windenergienutzung in Regionen wie dem eher landwirtschaftlich geprägten Nordwestdeutschland bereits eine dominierende ökonomische Bedeutung in Form von Folge- und Nachfolgeindustrien errungen [DStGB-2009]. Die von morphologischen und klimatischen Gegebenheiten bevorteilten Regionen mit hohem Windangebot, großer Flächenverfügbarkeit oder Küstennähe profitieren zusätzlich stark von durch den Betrieb der WEA bedingten Gewerbesteuerereinnahmen [BWE-2015].

Die Windenergie wird auch in Deutschland in Zukunft ein wesentlicher Bestandteil der Energieversorgung sein. Zudem ist das Repowering-Potenzial der aktuell rund 26 500 installierten WEA in Deutschland signifikant und bietet Grund zu der Annahme, dass auch in Zukunft Arbeitsplätze in der Windbranche und angeschlossenen Technikbereichen vorhanden sein werden. Der BWE rechnet in den nächsten Jahren mit einem Marktvolumen von bis zu 1 000 MW pro Jahr mit rund 1,5 Milliarden € Umsatz im Repowering-Bereich [BWE-2012]. Insbesondere die Entwicklung der Binnen- und Küstenstandorte wird maßgeblich von Repowering-Prozessen geprägt sein [Bönisch-2012]. Der Bereich des Rückbaus und der stofflichen Nutzung von Komponenten aus Windenergieanlagen, insbesondere der Faserverbundwerkstoffe, hat Bedarf an Forschung und Entwicklung und bindet somit weiterhin Wissen und Innovation. Welche rohstofflichen Vorteile sich aus dem Repowering möglicherweise für den Bereich der stofflichen Verwertung von Rotorblättern generieren lassen und welches technische und wirtschaftliche Potenzial der Verwertung darin liegt, bedarf weiterer Forschung.

6.2 Potenziale einer Circular Economy für Rotorblätter

6.2.1 Technologische, ökonomische und ökologische Grenzen der Circular Economy

Die erwarteten Materialmengen sind aktuell noch kein Problem für die Abfallwirtschaft, können es allerdings in Zukunft werden. Die Aufnahmefähigkeit der Recyclingwirtschaft ist gegeben, Abnahmemärkte für ein qualitätsgesichertes Sekundärprodukt ebenfalls, da die Verwendung faserverstärkter Kunststoffe auf dem Weltmarkt in den unterschiedlichsten Anwendungsbereichen groß ist (vgl. [Bittmann-2016]). Ein Verfahren zur stofflichen Verwertung im Zuge einer Circular Economy müsste sich aktuell mit dem Verfahren der energetischen und stofflichen Verwertung im Zementwerk messen.

Reine Produktionsabfälle bei der Glasfaserherstellung werden heute betriebsintern bereits wieder in den Schmelzprozess zurückgeführt. Dies ist jedoch nur möglich, da sie nicht aus einem EoL-Produkt stammen, welches zuvor durch einen thermischen oder chemischen Trennprozess von Faser und Matrix laufen muss. Aktuell können neue Rotorblätter aus Recyclingmaterial nicht hergestellt werden, da die Glasfasern, die aus thermischen und/oder chemischen Recyclingprozessen zur Trennung von Faser und Matrix entstehen, zu kurze Fasern mit geringerer Zugfestigkeit aufweisen und damit ein minderwertigeres Produkt darstellen [Yang-2015]. Die Faserlänge wird nach aktueller Einschätzung technisch nicht sinnvoll zu erhalten sein. Dabei stellt nach wie vor die Trennung

von Faser und Matrix das größte, bislang nicht gelöste Problem dar. So ist bislang eine Produktion von neuen Fasern aus EoL-Material nicht möglich [Pehlken-2016], [Woidasky-2013a].

An Rotorblätter werden folgende Anforderungen gestellt, die bisher mit Sekundärrohstoffen nicht erfüllt werden konnten:

- Hohe Festigkeit bei niedrigem Gewicht
- Haltbarkeit
- Witterungs- und korrosionsbeständigkeit (UV, Kälte, Wärme, Hagel, Fremdkörper, Regen- und Sanderosion, Salzwasser)
- Hohe Lebensdauer bei minimalen Produktions- und Unterhaltungskosten

Jedoch ist auch zu beachten, dass nicht zwingend ein Pfad »Glasfaser zu Glasfaser« notwendig sein muss, da der geringe Materialwert sonst eine ökonomische Hürde für ganzheitliche Recyclingverfahren darstellen würde. Wichtiger sind vor diesem Hintergrund die Etablierung von Verfahren zum Erhalt/Recycling der Funktion der Matrix sowie die parallele Verfolgung des Pfades »EoL-Glasfaser zu anderen Glasprodukten«.

Die Tatsache, dass das Aufkommen von WEA in den verschiedenen Bundesländern sehr stark differiert (siehe Bild 6-10) beeinflusst ein mögliches Sammel- und Verwertungssystem. Derartige Einrichtungen müssen dort vorgesehen werden, wo auch ein hohes Aufkommen zu erwarten ist, um so die Transportkosten möglichst gering zu halten. Bei dem geringen Materialwert, den die Rotorblätter nach Ihrer ersten Nutzungsphase bzw. am Ende des Lebenszyklus haben, müssen zudem der Demontageaufwand und die Logistikkosten so niedrig wie möglich angesetzt werden.

Bislang ist immer noch schwer abschätzbar, wie viele WEA tatsächlich zum Recycling zur Verfügung stehen werden; der Anfall ist sehr stark vom Repowering und vom Rückbau abhängig. Findet ein Verkauf ins Ausland statt, hat Deutschland keinen Zugriff mehr auf potenziell zu recycelnde EoL-Produkte, da diese ggf. im Ausland deponiert oder weiterverarbeitet werden. Wie in Kapitel 6.1.2 bereits dargestellt, existiert derzeit kein gesetzlicher Rahmen ausschließlich für Rotorblätter [Agatz-2014].

Der Betreiber/Besitzer hat ein großes Interesse, den Betrieb so lange wie möglich aufrecht zu erhalten, da er nach Ablauf der Abschreibung die größten Gewinne mit seiner Anlage erzielen kann. Allerdings muss nachgewiesen werden, dass seine Anlage nach Ablauf der EEG-Förderungsphase die vorgeschriebenen Standards auch weiterhin einhält (siehe Kapitel 6.1.2 und Kapitel 6.1.5). Jedoch ist nicht pauschal zu beantworten, inwieweit sich ein Weiterbetrieb auch über das Auslaufen der EEG-Vergütung nach 20 Jahren hinaus rentabel gestalten lässt. Dies wird wesentlich davon abhängen, wie sich der Börsenstrompreis entwickelt und wie das anlagenspezifische Direktvermarktungssystem eines Betreibers gestaltet ist. Der Anspruch auf Marktpremie nach §35 EEG ist ebenfalls ein wichtiger Faktor, der nicht pauschalisiert werden kann.

Eine weitere Herausforderung liegt im generellen Zerkleinern und im Glasfaserstaub begründet, der zwangsläufig beim Zerkleinern der Rotorblätter freige-

setzt wird. Dieser stellt ein hohes Arbeitssicherheitsrisiko dar, weshalb die Zerkleinerung in geschlossenen Räumen nur mit hohen Auflagen möglich ist. So müssen beispielsweise Sprühnebel eingesetzt werden, die die Staubentwicklung eindämmen [Geocycle-2016].

6.2.2 Innovationspotenziale und Geschäftsmodelle der Circular Economy

Der 2013 von DLR, ForWind und dem Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik IWES gegründete »Forschungsverbund Windenergie« hat die Standortidentifikation, Logistik und Bauverfahren sowie den Betrieb von Windenergieanlagen als gemeinsame Forschungsbereiche identifiziert. Der Rückbau und das Ende des Lebenszyklus einer Windenergieanlage werden im Forschungsverbund nicht betrachtet. Hier sollte in Zukunft weiter vorangegangen werden und die verschiedenen Faktoren rund um das Lebensende einer Windenergieanlage und dessen Nachnutzungsphase gemeinsam mit Industrie und Forschung sollten weiter untersucht werden. So wird im Projektverbund ReKomp unter anderem die materialspezifische Demontage mittels Wasserstrahlschneiden und energetischer Demontage sowie die anschließende Matrix-Faser-Materialtrennung untersucht [Seiler-2014].

Zurzeit versuchen einige Forschungsinstitute, das Problem des Rotorblattrecyclings durch Substitution der eingesetzten Materialien zu lösen. So arbeitet das Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU in Chemnitz im Rahmen des Projekts HyBlade daran, Rotorblätter aus reinem, laserschweißtem Edelstahl herzustellen [Lamß-2015]. Ebenso auf Substitution setzt das Institut für Windenergietechnik der Fachhochschule Flensburg WETI: Es versuchte in einem 2016 abgeschlossenen Projekt, die Entwicklung von Rotorblättern aus reinem Holz voranzutreiben [WETI-2015]. Grenzen sind durch die relativ höheren Dichten beider Werkstoffe gegeben, die durch neue Technologien überschritten werden müssen, um ein realistisches Gewicht der Rotorblätter zu erhalten. Hierbei sind somit mögliche Trade-offs zu berücksichtigen, die ggf. durch ein zu hohes Gewicht geringere Rotorgrößen notwendig machen und somit die Energiegewinnung beeinflussen.

Bislang konnte der Einsatz von Thermoplasten statt Duroplasten die Anforderungen an Stabilität und Belastbarkeit eines Rotorblatts nicht erreichen. Um dies zu ändern, setzt das Forschungskonsortium des EU-Projekts WALiD (Wind Blade Using Cost-Effective Advanced Lightweight Design) gemeinsam mit zehn Partnern aus Industrie und Forschung auf eine Sandwichbauweise aus thermoplastischen Schäumen mit faserverstärkten Kunststoffen. Der Verbund untersucht den Einsatz von stabilen und leichten thermoplastischen Schäumen anstelle der duroplastischen Harzsysteme. Durch die Verwendung der schmelzbaren Kunststoffe soll die Separation von Faser und Matrix einfach durchführbar sein und somit in Zukunft ein Recycling ermöglichen [Quitter-2016].

Ein anderer Weg, der beschritten wird, ist die Materialentwicklung zur Verlängerung der Lebensdauer, wie es zum Beispiel in dem Projekt HyRos von einem Konsortium um die Firma Saertex betrieben wird [HyRoS-2016]. Durch spezielle Beschichtungsverfahren soll die Lebenserwartung der Rotorblätter empfindlich verlängert werden. Ebenfalls auf Lebensdauererhöhung setzt das Fraunhofer-Institut IWES in Bad Hersfeld. Dies soll im Rahmen des Projekts LENA durch

den Einsatz nanomodifizierter und hybrider Werkstoffsysteme erreicht werden [Sayer-2015a]. Die Erhöhung der Lebenserwartung bei erhöhter Sicherheit und möglichst geringen Kosten soll durch das Projekt KompZert vom Fraunhofer-Instituts IWES in Zusammenarbeit mit der Germanischer Lloyd Industrial Services GmbH erzielt werden. Wie in der Luftfahrtindustrie bereits üblich, sollen auch für Rotorblätter allgemeine Grundsätze für Prüfverfahren entwickelt werden [Sayer-2015b].

Solange ein hochwertiges Recycling der Glasfaser technisch nicht realisierbar ist, sollten daher folgende Punkte im Sinne einer Circular Economy verfolgt werden:

Ein Ziel der chemischen Industrie kann sein, umweltfreundlichere Einsatzstoffe für die Produktion der notwendigen Harzproduktion anzubieten. Um dies zu erreichen und um von Anfang an bei neuen Entwicklungen dabei zu sein, sollte die chemische Industrie sich aktiv an Forschungsprojekten zur Materialentwicklung mit dem Ziel der Lebensdauerverlängerung und Konservierung bestehender Rotorblätter beteiligen.

Die Wiedernutzung von Glasfasern aus Verbundwerkstoffen soll vorangetrieben werden, dazu ist eine Steigerung der Materialeffizienz notwendig. Denkbar ist beispielsweise die Anwendung von Glasfasermehlen als Substitut für Primärmaterial («Glasfaser zu Glas»). Auch sollte über den wertigeren Einsatz der Glasfasermehle in der Bauchemie oder der Kunststoffindustrie nachgedacht werden («Glasfaser zu Füllstoff»). Des Weiteren sollte eine Kooperation mit der Stahlindustrie initiiert werden, da die recycelten Glasfasern zum Beispiel als Zuschlagmaterial oder als Schlackebildner eingesetzt werden könnten.

Unabhängig von der Recyclingfähigkeit sollte die Automatisierung der Fertigung vorangetrieben werden, um damit die Herstellungskosten zu minimieren. Dazu würde auch der Einsatz von Polyurethanen (PUR) als alternativem Werkstoff zu Epoxiden und Polyesterwerkstoffen beitragen, da auf diese Weise die Füllzeiten von bisher 24 Std. auf 3 Std. verkürzt werden können [Covestro-2016]. Sinnvoll erscheint auch weiterführende Forschung zur Überwindung des Square-Cube-Law: Die Leistung der Anlage steigt mit dem Quadrat der Rotorblattlänge, dabei wächst das Blatt in allen drei Dimensionen, entsprechend steigen Kosten und Gewicht mit der dritten Potenz der Blattlänge. Mit dem Wachstum der Rotorblätter sinkt auch die Möglichkeit eines Weiterbetriebes im Ausland, da die Transportkosten einen immer größeren Teil des Verkaufsgewinns neutralisieren.

6.2.3 Politische und regulatorische Hemmnisse für die Circular Economy

Im Falle der Rotorblätter stehen der Circular Economy keine gesetzlichen Rahmenbedingungen entgegen, da sie bislang nicht stofflich recycelt werden und von Seiten des Gesetzgebers keine Anforderungen hinsichtlich ihrer Recyclingfähigkeit gestellt werden. Vielmehr sind es hier die Probleme auf technischer sowie auf Materialseite, die der Circular Economy entgegenstehen, um überhaupt eine wirkliche stoffliche Verwertung in Form neuer Rotorblätter zu ermöglichen (s. 6.2.1).

Viele der Anlagen werden nach Ablauf der 20-jährigen Bezuschussung gem. EEG zurückgebaut, weil sich in der Folgezeit die Gewinne um die entfallene Vergütung verringern (Bild 6-7). An sehr guten Standorten und abgeschriebenen Anlagen wird ein Weiterbetrieb nach technischer Überprüfung von den Betreibern jedoch gewünscht, da die Anlagen je nach Standort auch ohne Vergütung noch wirtschaftlich betrieben werden können und die Betreiber das Risiko einer Neuanschaffung (noch) nicht eingehen wollen. Für andere Betreiber ist es jedoch wirtschaftlich interessanter, eine neue Anlage zu errichten, um erneut in den Genuss der EEG-Zuschläge zu kommen. Der als Anreiz unter bestimmten Voraussetzungen bis 31.7.2014 gewährte »Repowering-Bonus«⁹ des alten EEG-2012 ist im aktuellen EEG ersatzlos gestrichen.

Ab 2014 gilt eine weitere Neufassung: Wurde in den letzten zwei Jahrzehnten der Ausbau im Wesentlichen über die Höhe der finanziellen Förderung beeinflusst, sieht das geänderte EEG jährliche Ausschreibungshöchstmengen vor und schafft damit im Bereich der Windenergie eine faktische Obergrenze für die Installation neuer Stromerzeugungskapazitäten [FA-Wind-2016]. Wie sich das mittelfristig auf das Verhalten der Betreiber hinsichtlich des Rückbaus auswirkt, wird die Zukunft zeigen. Dabei ist zu beachten, dass ein Zielkonflikt zwischen dem gewünschten stetigen Ausbau der Windenergie sowie der andererseits möglichst langen Nutzungsphase vermieden werden muss. Der Ausbau sollte daher aus Sicht einer Circular Economy im Idealfall mit einem Repowering-Vorgang und einer zweiten Nutzungsphase der Altanlage erfolgen. Dabei kann als Faustformel aus Sicht der Circular Economy und unter Ausschluss von standortspezifischen Besonderheiten pragmatisch zusammengefasst werden, dass der Betrieb einer WEA im Spannungsfeld des »so lange wie möglich« und des »jedoch so schnell wie nötig« im Sinne eines Generationswechsels (und den damit einhergehenden höheren Stromerträgen) der Anlagentypen stattfinden sollte. Dieser Bereich bedarf jedoch noch weiterer Forschung.

Einen großen Einfluss auf die weiteren Repowering-Unternehmungen hat die Höhenbeschränkung für WEA. Diese ist in den Flächennutzungs- und Bebauungsplänen festgeschrieben und beträgt meist 100 Meter Gesamthöhe [Bönisch-2012]. Je nach Anlagentyp wird diese Höhe jedoch überschritten und ein aufwändiges Verfahren zur Änderung des gesetzlichen Rahmens müsste durchgeführt werden. Nach Einschätzungen des BWE sind diese Höhenbeschränkungen sowie die generell strengen Regelungen bei Mindestabständen zu Siedlungsinfrastruktur und Schutzgebieten der Hauptgrund für ein gebremstes Repowering in Deutschland [BWE-2015]. Konsequenz der eingeschränkten Nutzungsmöglichkeit von aktueller Anlagentechnik sei die starke Verringerung des energetischen Repowering-Potenzials.

Ein weiteres Problem von Repowering-Projekten ist die Zeit- und Planungsintensität, da bei Anlagen mit mehr als 50 m Gesamthöhe nach 4. BImSchV eine Durchführung nach BImSchG vorgeschrieben ist. Zur Zeit ihrer Errichtung fielen die Altanlagen nicht unter dieses Gesetz und wurden somit oftmals an Standort-

⁹ Erhöhung der Anfangsvergütung um 0,5 ct/kWh wenn: Inbetriebnahme der Altanlage vor 1. Jan 2002; installierte Leistung der Neuanlage beträgt mindestens das zweifache der Altanlage; Anzahl der Neuanlagen übersteigt nicht die Anzahl der Altanlagen

ten errichtet, an denen neue WEA ein Verfahren nach BlmSchG nicht erfüllen können. Durch Planungsfehler in der Vergangenheit befinden sich die alten Anlagen oftmals dicht an Siedlungsgebieten und lassen einen Neubau von großvolumigen WEA nach gültigem Baurecht oder aktuellen Abstandsregelungen der jeweiligen Bundesländer nur in Einzelfällen zu [Övermöhle-2012]. Hemmnisse sind teilweise auch in der Netzinfrastruktur begründet. Zwar ist durch die bessere Regeltechnik der neu installierten WEA eine wesentlich konstantere Einspeisung zu erwarten, jedoch ist die Netzinfrastruktur an den alten Anlagenstandorten nicht immer auf die durch die leistungsfähigeren WEA gelieferten Strommengen ausgelegt. Dies kann Probleme bei der Netzintegration der neuen Anlage verursachen [Övermöhle-2012]. Die gesamten Repoweringhürden werden in einer Studie mithilfe eines Hemmniskatalogs qualitativ erfasst [Bönisch-2012].

6.2.4 Notwendige Rahmenbedingungen und Impulse zur Umsetzung der Circular Economy

Um Auswirkungen möglicher regulatorischer Rahmenbedingungen zu diskutieren, müsste das stoffliche Recycling erst marktverfügbar sein. Bedingung dafür sind erfolgreiche Verfahrensentwicklungen zum Wiedereinsatz von EoL-Fasern in neuen Rotorblättern. Um die kritische Masse an Material für ökonomische Recyclingprozesse bereitzustellen, müssen an strategisch wichtigen Orten Sammelstationen oder Demontagezentralen gebaut werden. Eine Erhöhung der Materialmengen ist auch durch eine Zusammenlegung verschiedener Stoffströme denkbar. So werden im Bereich Flugzeug- sowie Bootsbau häufig ähnliche Materialien eingesetzt, deren gemeinsames Recycling denkbar wäre.

Ein erster Schritt in Richtung Zentralisierung ist das Projekt »DemoNetXXL – Demontagenetzwerke für XXL-Produkte« des Instituts für Integrierte Produktion Hannover (IPH). Der Verbund wird bis Ende 2017 durch die DFG bei der Forschungsarbeit unterstützt, wie der großangelegte Rückbau von Windenergieanlagen gelingen kann [IPH-2016].

Das Fraunhofer-Institut IWU prüft die Herstellung von Rotorblättern aus Metall, die ein Recycling deutlich vereinfachen würden [Lamß-2015]. Ebenso wie die Entwicklung des Fraunhofer-Instituts IWES, bei der Rotorblätter aus Holz entstehen sollen [WETI-2015].

6.3 Zusammenfassung Stoffstrom Rotorblätter

Solange der Anwendungsfall »Glasfaser zu Glasfaser« technisch nicht realisierbar ist, liegen mögliche Anknüpfungspunkte für die Leistungen der chemischen Industrie kurzfristig beispielsweise in der Bereitstellung umweltfreundlicher Einsatzstoffe für die Rotorblattproduktion. Kurz- bis mittelfristig müssen Forschungsprojekte mit dem Ziel der Lebensdauerverlängerung und Konservierung bereits eingesetzter Blätter ins Leben gerufen und Anwendungen für die Wiedernutzung von Glasfasern aus Verbundwerkstoffen geschaffen werden. Ein mögliches Thema sollte dabei auch die Schaffung von Anwendungen von Glasfasermehl als Substitut für Primärmaterial (»Glasfaser zu Glas«) sein; dabei sollte eine Kombination öffentlicher und industrieller Förderung angestrebt werden, um den Anforderungen der Industrie besser gerecht zu werden. Die For-

schung an alternativen Materialien zur Substitution muss jedoch parallel weitergeführt werden. Dabei ist auf mögliche Zielkonflikte hinsichtlich Energieausbeute und Recyclingfähigkeit zu achten.

Im Bereich der Bauchemie und der Kunststoffindustrie sollte nach Möglichkeiten zum Einsatz »Glasfaser zu Füllstoff« gesucht werden.

Der Absatz und Weiterbetrieb kompletter Altanlagen wird in Zukunft schwieriger, da auch dort ein Sättigungseffekt auftreten wird. Zudem steigen die Transportkosten durch die zunehmende Größe der Anlagen deutlich an.

Aus Circular-Economy-Sicht ist der Weiterbetrieb von Anlagen über einen Zeitraum von 20 Jahren hinaus unter Einhaltung aller Sicherheitsrichtlinien ein denkbarer Ansatz, solange noch keine zufriedenstellenden stofflichen Verwertungswege existieren und ein Weiterbetrieb den Ausbauzielen des EEG nicht im Wege steht. Auf diese Weise wird gleichzeitig Zeit geschaffen, über geeignete Standorte für Demontagestationen in Deutschland nachzudenken. So kann sichergestellt werden, dass möglichst viel EoL-Material zur Auslastung möglicher Aufbereitungsanlagen verfügbar ist. Die bisherigen Insellösungen mit Zwischenlagerung bei Entsorgern und Servicedienstleistern der Branche wären dann hinfällig. An dieser Stelle muss der Zielkonflikt Recycling vs. Energieausbeute in der Nutzungsphase betrachtet werden. Eine Laufzeitverlängerung darf einer erhöhten Energieausbeute durch Einsatz modernerer Technologien beim WEA-Bau nicht entgegenstehen. In diesem Zusammenhang sollte auch über eine Einflussnahme ausgehend von der Gestaltung der EEG-Zulage nachgedacht werden.

Sollte die Windenergiebranche ihre große Bedeutung für die Energiewende auch auf die Rohstoffwende ausweiten wollen, wäre es empfehlenswert, gemeinsam mit allen Akteuren hier an neuen Lösungen entlang der Wertschöpfungskette mitzuarbeiten. Das Design-for-Recycling der Rotorblätter sollte stärker beachtet werden und gemeinsam mit den Roh- und Grundstoffproduzenten vorangetrieben werden. Die Anfänge sind gemacht (vgl. Kapitel 6.2.2). Die aktuelle Menge von EoL-Material aus Rotorblättern ist eher unattraktiv und zudem starken regionalen Schwankungen unterworfen. Die Mengenverfügbarkeit für ein wirtschaftliches Recyclingverfahren ist unter aktuellen Verhältnissen auch langfristig nicht sichergestellt. Die Herstellung einer »kritischen Materialmenge« zum Betrieb eines stofflichen Recyclingzentrums muss aus Sicht einer Circular-Economy auch unter der Berücksichtigung von anderen Faserverbundwerkstoffabfällen in Zukunft Priorität haben.

7 Analyse und Einfluss der Circular Economy in Bezug auf LCD-Computerbildschirme

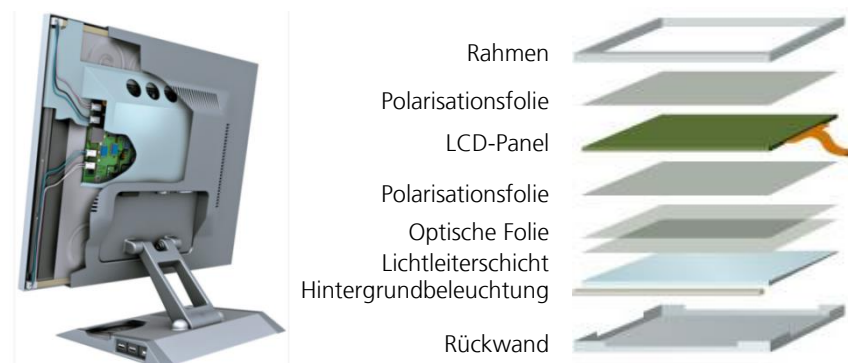
7.1 Erfassung der aktuellen Lage

Sowohl in privaten Haushalten als auch im geschäftlichen Bereich gehört die Nutzung von Computern längst zum Standard. Daten und Informationen werden mithilfe von Monitoren visualisiert. Dabei wurde die ursprünglich verwendete Bauweise des »Röhrenmonitors«, basierend auf einer Kathodenstrahlröhre (engl. cathode ray tube, kurz CRT), kontinuierlich durch platzsparende und leistungsstarke Flachbildschirme abgelöst. So waren im Jahr 2010 in der EU-25 etwa 200 Millionen Flachbildschirmmonitore und nur noch 2 Millionen CRT-Monitore in der Nutzung [Prakash-2011]. Flachbildschirme werden darüber hinaus auch in starkem Maße als Fernseher genutzt. Dieser Stoffstrom wird in dieser Studie jedoch nicht berücksichtigt. Bei Flachbildschirmen handelt es sich um komplex aufgebaute Produkte, welche beispielsweise kritische Metalle aber auch teilweise gesundheits- und umweltschädliche Schwermetalle enthalten, wodurch nach dem Ende der Nutzungsphase entsprechend hohe Anforderungen an eine beschädigungsfreie Erfassung, hochwertige Erstbehandlung sowie Recycling- und Verwertungsprozesse gestellt werden.

7.1.1 Herstellung, Design, Zusammensetzung und Funktion

Bei Flachbildschirm-Computermonitoren handelt es sich um eine Anzeige für die Darstellung von Informationen, die eine flache Oberfläche besitzt. Die Oberfläche enthält eine aktive Fläche, die aus einer regelmäßigen Zeilen- und Spaltenanordnung von elektrisch veränderbaren, diskreten Bildelementen (Pixel) besteht [CEN-1999]. Bei diesen Monitoren sind sogenannte Dünnschichttransistor (engl.: thin film transistor, kurz TFT)-Flüssigkristallanzeigen (engl.: liquid crystal display, kurz LCD) der am häufigsten angewendete Bautyp [Prakash-2011]. Das grundsätzliche **Design** beziehungsweise der Aufbau von TFT-LCD-Monitoren kann Bild 7-1 entnommen werden.

Bild 7-1:
Schematische Darstellung des Aufbaus eines TFT-LCD-Monitors [Computerbild-2007]



Während der Fuß und das äußere Gehäuse eines Monitors meist aus Kunststoff gefertigt sind, bestehen Rückwand und Rahmen häufig aus Metallen wie Eisenblech oder Aluminium. Hinter dem Display sind zudem Leiterplatten und

Kabel angebracht; erstere enthalten neben Kupfer auch Edelmetalle sowie verschiedene, teilweise in geringer Konzentration vorhandene, weitere Metalle. Auch die Anschlüsse, welche sich bei Bild 7-1 beispielsweise am Fuß des Monitors befinden, sind edelmetallhaltig, wobei durch die fortschreitende technische Entwicklung der Gehalt an Edelmetallen, besonders in Leiterplatten, jedoch stetig sinkt [Nunweiler-2016a].

Das eigentliche Display ist schichtweise aufgebaut und enthält als Herzstück das sogenannte »Panel«. Bei dem Panel handelt es sich um zwei Glasscheiben, zwischen denen sich eine Schicht aus Flüssigkristallen befindet. Auf der einen Glasscheibe sind farbgebende Strukturen, auf der anderen Dünnschicht-Transistoren aufgebracht. Auf beiden Glasscheiben ist zudem Indium-Zinnoxid aufgetragen (engl. indium tin oxide, kurz ITO) [Rotter-2012]. Die verwendeten Panelmaterialien unterscheiden sich bei den verschiedenen Displaytechnologien stark voneinander. Neben LCD-TFT-Geräten sind auch Plasmageräte auf dem Markt, die jedoch bei Computermonitoren nur einen geringen Marktanteil einnehmen. Vergleichsweise neu sind Displays mit organischen Leuchtdioden, kurz oLED. Darüber hinaus sind auch bereits Geräte mit sogenannter Quantum-Dot-Technologie verfügbar [Nunweiler-2016b].

Auf den Außenseiten des Panels sind Polarisationsfolien angebracht [Sellin-2016], welche aus Cellulosetriacetat, Polyvinylalkohol oder Triphenylphosphat bestehen. Die Hintergrundbeleuchtung wird bei älteren Modellen über Kaltkathodenröhren (CCFL¹⁰) realisiert, die bruchempfindlich sind und Quecksilber (Hg) enthalten. Bei neueren Modellen werden dagegen lichtemittierende Dioden (LED) eingesetzt, welche primär aus Glas, Kunststoff und einer Metallfassung bestehen, aber auch kritische Metalle wie Gallium oder Germanium enthalten [Cucchiella-2015], [Sellin-2016]. Zur uniformen Beleuchtung des Displays werden Streuscheiben, sogenannte Lichtleiterschichten, aus Polymethylmethacrylat (PMMA) oder Polystyrol (PS) eingesetzt [Elektrocycling-2015].

TFT-LCD-Bildschirme werden in vier Fertigungsschritten produziert, wobei die Fertigungsverfahren hochkomplex sind und in Abhängigkeit von der Art der LCD-Technologie sowie von Hersteller zu Hersteller variieren können. Stark vereinfacht kann der **Herstellungsprozess** wie folgt beschrieben werden (vgl. auch Bild 7-2).

Zunächst werden in getrennten Produktionsstraßen Farbfilter und Dünnschichttransistoren (TFT) auf je einer Glasplatte aufgebracht. Für die Herstellung des Farbfilters wird zunächst in einem Photolithographieprozess die Berandung der schachbrettartig angeordneten Pixelzellen erzeugt.

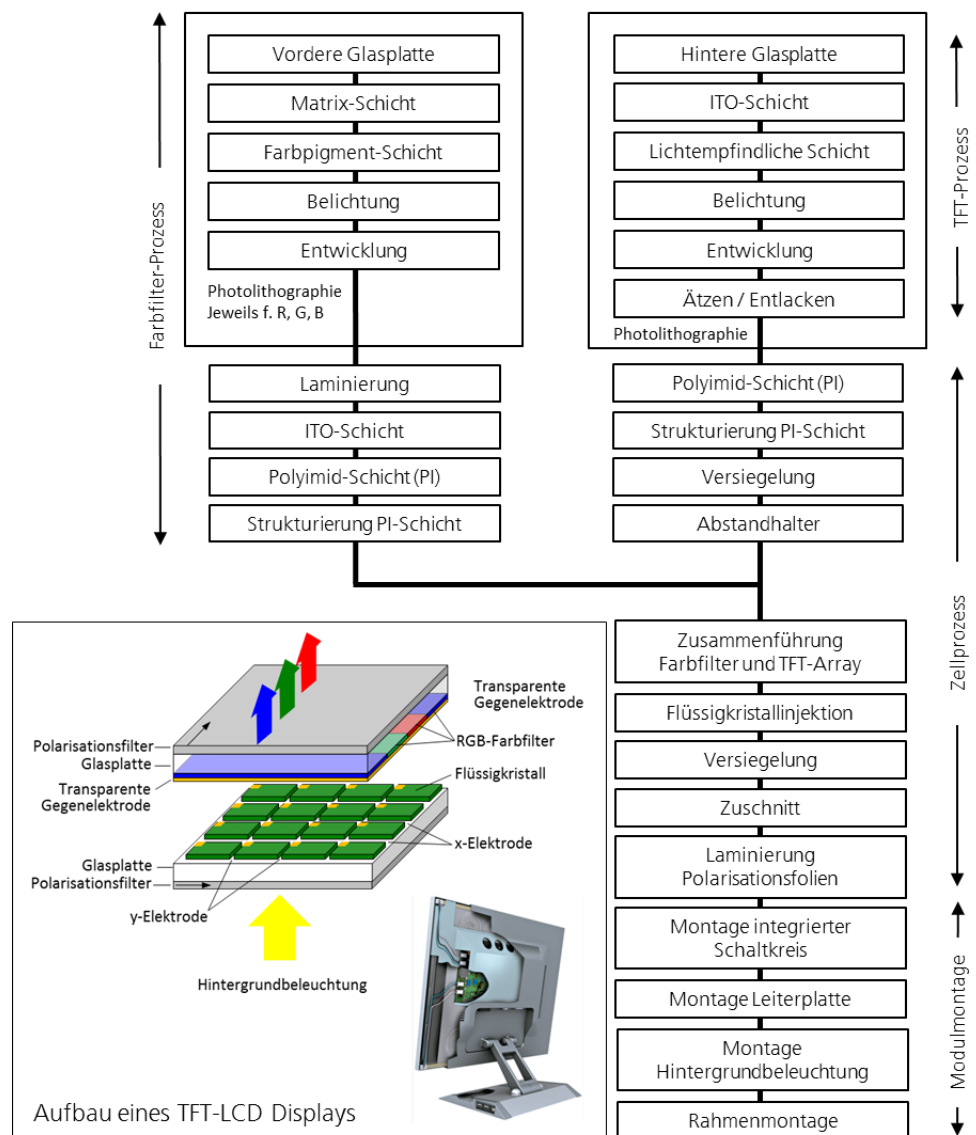
Nachfolgend werden in einem dreistufigen Prozess die lichtempfindlichen Farbpigmente (rot, grün, blau) aufgebracht. Anschließend wird die erzeugte Pixelstruktur laminiert und eine elektrisch leitende und zugleich lichtdurchlässige Indium-Zinnoxid-Schicht (ITO) aufgebracht, die als Gegenelektrode fungiert und durch eine Polyimidschicht isoliert wird. Die Polyimidschicht wird abschließend

¹⁰ Cold cathode fluorescent lamp

so strukturiert, dass eine spätere Ausrichtung der Flüssigkristalle parallel zur Ausrichtung des Polarisationsfilters erfolgen kann.

Auf der zweiten Glasplatte werden mit Indium-Zinnoxid Dünnschichttransistoren erzeugt, um die Ausrichtung der Flüssigkristalle in den einzelnen Pixeln durch das Anlegen einer Spannung steuern zu können. Die ITO-Schicht wird mit Polyimid beschichtet und analog zur Farbfilterschicht in Richtung des Polarisationsfilters strukturiert. Die so präparierten Glasscheiben werden unter Verwendung von Abstandhaltern zusammengepresst. In den entstehenden Zwischenraum werden die Flüssigkristalle injiziert. Die Kanten werden versiegelt, die Module zugeschnitten und die Polarisationsfolien werden aufgebracht. Im Anschluss erfolgt die Montage der integrierten Schaltkreise, der Leiterplatten und der Hintergrundbeleuchtung. Abschließend wird der Rahmen montiert.

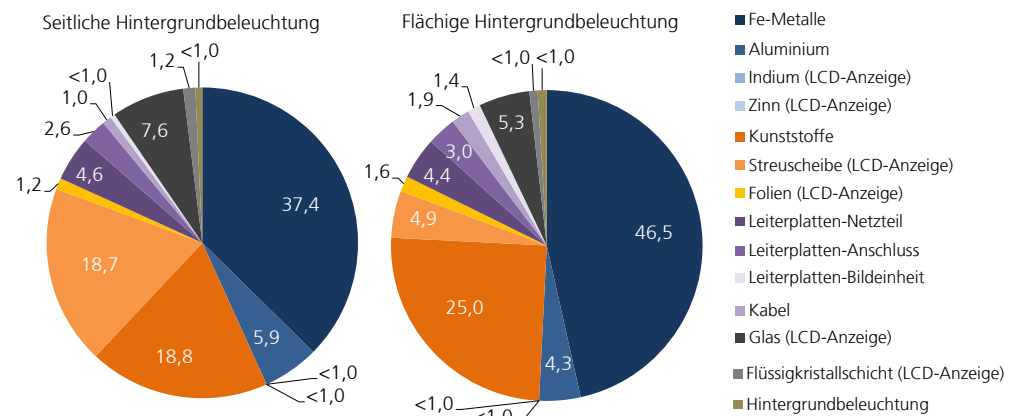
Bild 7-2:
Produktionsprozess von
TFT-LCD Bildschirmen
(modifiziert nach
[Minami-2007]) und
Aufbau eines TFT-LCD-
Displays (eigene Dar-
stellung und
[MWEIMH-2016],
[Sellin-2016], [Compu-
terbild-2007])



In Bezug auf die werkstoffliche **Zusammensetzung** kann man bei LCD-Bildschirmen grundsätzlich zwischen Geräten mit seitlicher und mit flächiger

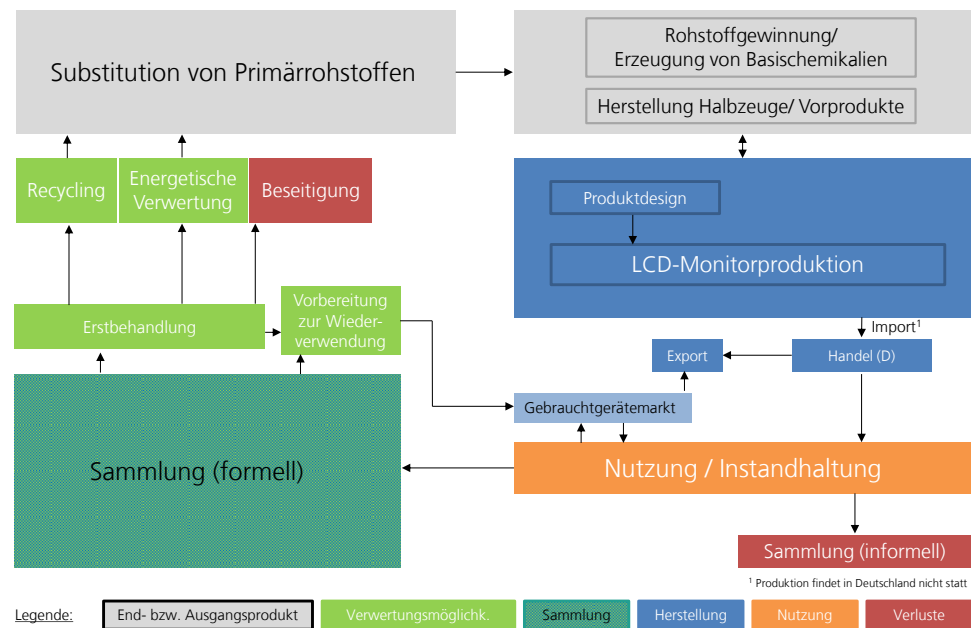
Hintergrundbeleuchtung unterscheiden. Wie Bild 7-3 verdeutlicht, machen bei beiden Typen Eisenmetalle und Kunststoffe das Hauptgewicht aus. Darauf folgen die Streuscheibe und das Glas der LCD-Anzeige sowie Aluminium und Leiterplattenbauteile. Die Flüssigkristallschicht der bildgebenden Einheit macht bei Geräten mit seitlicher Hintergrundbeleuchtung nur knapp über 1 Gew.-%, bei Geräten mit flächiger Hintergrundbeleuchtung weniger als 1 Gew.-% des Gesamtgewichts der Geräte aus. Indium und Zinn liegen jeweils deutlich unter 1 Gew.-%. Je Tonne LCD-Panel sind zwischen 50 und 250 g [Jalapoor-2013] bzw. 0,8 mg/m² Indium enthalten [Eppenberger-2011]. Daneben ist in der bildgebenden Einheit auch Gallium enthalten. Sowohl bei Indium als auch bei Gallium handelt es sich um Sondermetalle, welche in den Jahren 2010 und 2014 von der Europäischen Union als versorgungskritisch eingestuft worden sind [Christman-2014]. Geräte mit CCFL-Hintergrundbeleuchtung enthalten zudem etwa 10,8 - 40 mg Quecksilber je Gerät [Sellin-2016].

Bild 7-3:
Zusammensetzung von
LCD-Bildschirmgeräten
in Gew.-% gemäß
[Elektrocyling-2015],
[Rotter-2012]



Ausgehend von dem bereits beschriebenen Herstellungsprozess zeigt Bild 7-4 eine vereinfachte **Wertschöpfungskette** für LCD-Computerbildschirme. Die nach der Herstellung folgenden Stufen Nutzung, Erfassung und Verwertung/Entsorgung werden in den folgenden Kapiteln 7.1.2 bis 7.1.8 genauer beschrieben. Eine detaillierte Erläuterung der Wertschöpfungskette ist in Kapitel 7.1.6 zu finden.

Bild 7-4:
Stoffflüsse für LCD-
Computerbildschirme
(vereinfacht) nach
[Haberlag-2006],
[Minami-2007], [LCD-
2016]



7.1.2 Rechtliche und nutzerseitige Anforderungen an die Produktperformance

Für das Inverkehrbringen von Computerbildschirmen bestehen umfangreiche gesetzliche Anforderungen, die die vier Bereiche Gerätesicherheit, elektromagnetische Verträglichkeit, Telekommunikation und Umwelt umfassen. Inverkehrbringer der Produkte bestätigen mit der CE-Kennzeichnung am Produkt die Konformität zu diesen gesetzlichen Anforderungen. In einer in Anhang 10.2 dargestellten Tabelle sind die zur Abdeckung der vier Bereiche der CE-Kennzeichnung relevanten ordnungspolitischen Regelungen sowie Normen, Standards und marktübliche Anforderungen zusammenfassend dargestellt. Neben diesen Anforderungen bestehen weitere Anforderungen, die nicht über die CE-Kennzeichnung abgedeckt, aber dennoch zu erfüllen sind. Hierzu zählen unter anderem Anforderungen, die aus dem Elektro- und Elektronikgerätegesetz (ElektroG), dem Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG), der Verpackungsverordnung (VerpackV), dem Batteriegesezt (BattG) oder auch dem Chemikaliengesetz (ChemG) resultieren. Insbesondere aus diesen Vorgaben ergeben sich Produktanforderungen, die direkt mit kreislaufwirtschaftlichen Aspekten in Verbindung stehen. Aber auch andere Parameter haben Auswirkungen auf das spätere Recycling (z. B. Flammschutzmittel in Kunststoffen).

Ebenso bestehen grundlegende Anforderungen des Nutzers, zum Beispiel bezüglich der Leistung und Bildqualität, der Anschaffungskosten, des Stromverbrauchs, des Designs oder der Lebensdauer von Computerbildschirmen. Diese Anforderungen spiegeln sich teilweise auch in Produkt-Labels wider, für deren Vergabe über die gesetzlichen Vorgaben hinaus bestimmte Kriterien zu erfüllen sind. Zu den für Bildschirmgeräte relevanten Vertretern gehören beispielsweise

die Prüfzeichen »TCO¹¹« und »ECO-Kreis«. Die TCO-Kriterien für Monitore umfassen etwa die Regelbarkeit der Bildschirmhelligkeit, um dem Nutzer bei wechselnden Umgebungsbedingungen ausreichend Kontrast und eine damit verbundene gute Erkennbarkeit in der Darstellung zu ermöglichen. Ebenso fließen Vorgaben über eine optimale ergonomische Gestaltung von Bildschirmgeräten in die Kriterien mit ein. Da auch Umweltaspekte für die Verbraucher zunehmend von Bedeutung sind, macht das TCO-Label unterschiedliche Vorgaben bezüglich des Herstellungsverfahrens. Für eine Vergabe ist etwa die Zertifizierung der Montagewerke (z. B. nach ISO 14001 oder EMAS) notwendig. Des Weiteren werden unter dem Aspekt Klimaschutz der Stromverbrauch der Geräte geprüft und, ähnlich zu den gesetzlichen Mindestanforderungen nach [EP ER-2003], die Verwendung giftiger Substanzen wie Schwermetalle und Halogenverbindungen limitiert oder untersagt. TCO schließt dabei, zusätzlich zu den Forderungen nach [EP ER-2003], die Verwendung von Quecksilber in der Hintergrundbeleuchtung von Bildschirmen aus. Zudem handelt es sich um ein globales Produktlabel, weshalb auch Produkte, die außerhalb der EU verkauft werden, nach den festgesetzten Vorgaben bewertet werden können [TCO-2015].

7.1.3 Produktions- und Abfallmengen

In Deutschland wurden im Jahr 2013 rund 157 300 Tonnen Altgeräte der Sammelgruppe IT- und Telekommunikationsgeräte erfasst [Eurostat-2016]. Gemäß Angaben zur Zusammensetzung dieser Sammelgruppe der Stiftung Elektroaltgeräte Register (EAR) waren ca. 39 000 Tonnen Bildschirmgeräte enthalten [Stiftung EAR-2016a]. Es ist jedoch nicht bekannt, wie hoch der Anteil an Flachbildschirmgeräten an diesen jährlich anfallenden Monitormengen ist. Nach [Sellin-2016] konnten im Jahr 2013 rund 3 000 000 LCD-Computerbildschirme der Erstbehandlung zugeführt werden. Bei einem Durchschnittsgewicht von 5,59 kg [Elektrocycling-2015] würde sich für das Jahr 2013 eine hochgerechnete Menge von rund 16 770 Tonnen ergeben. Dies erscheint auch aufgrund der Tatsache, dass Experten erst in 2020 mit einer Gleichverteilung von CRT- und Flachbildschirmen im Abfallstrom rechnen, durchaus plausibel [Kloiber-2012].

Im europäischen Raum wurden insgesamt rund 586 300 Tonnen Altgeräte der Sammelgruppe gesammelt. Nimmt man an, dass der Anteil an Bildschirmgeräten in etwa dem von Deutschland entspricht, wurden in 2013 ca. 145 000 Tonnen an ausgedienten CRT- und Flachbildschirmmonitoren erfasst [Eurostat-2016], [EAR-2016]. Da die über offizielle Systeme erfasste Menge im EAG-Bereich grundsätzlich geringer ist als die gesamte Abfallmenge, wurde durch [Cucchiella-2015] eine Hochrechnung auf europäischer Ebene durchgeführt, wonach im Jahr 2014 198 000 Tonnen allein an LCD-Computerbildschirmen anfielen. [Salhofer-2011] geben die Menge für die Jahre 2013 und 2014 etwas geringer mit etwa 150 000 Tonnen an.

¹¹ TCO = Prüfsiegel des Dachverbands der schwedischen Angestellten- und Beamtenengewerkschaft, der Tjänstemännens Centralorganisation (TCO).

Für die zukünftige Mengenentwicklung kann davon ausgegangen werden, dass die Anzahl anfallender Altgeräte in den nächsten Jahren nicht oder kaum steigen wird [Salhofer-2011], [Sellin-2016], [LCD-2016]. An Neugeräten wurden im Jahr 2014 in Deutschland ca. 2,1 Millionen flache Computermonitore verkauft [UBA-2016b]. Im Bereich der Monitore kann dabei von einer Marktsättigung ausgegangen werden, da diese im Privatanutzerbereich durch Tablets und Notebooks verdrängt werden und zukünftig der Großteil der Geräte im geschäftlichen Bereich benutzt werden wird [Elektrocycling-2015].

7.1.4 Aktuelle Zielvorgaben für die Verwertung

Nach dem deutschen ElektroG¹² und der europäischen WEEE-Richtlinie¹³ sind Hersteller und Vertreiber von Elektro- und Elektronikgeräten im Sinne der Produktverantwortung verpflichtet, diese Geräte vor dem Verkauf zu registrieren sowie diese nach der Nutzungsphase zurückzunehmen und einer ordnungsgemäßen Behandlung zuzuführen. Die aus der geforderten Erstbehandlung der Geräte gewonnenen Fraktionen müssen zu bestimmten Anteilen zur Wiederverwendung vorbereitet und recycelt bzw. verwertet werden. Die derzeit in Deutschland geltenden Recycling- und Verwertungsquoten für die Gerätekategorie 3 (IT- und Telekommunikationsgeräte), der die LCD-Flachbildschirme zugeordnet sind, sind in Tabelle 7-1 dargestellt. Die Quoten wurden der europäischen WEEE-Richtlinie entnommen und mit der Novelle des ElektroG Ende 2015 in deutsches Recht übertragen.

Tabelle 7-1: Recyclingquoten nach WEEE-Richtlinie [EP ER-2012] und ElektroG [ElektroG-2015]

Art der Verwertung/Regelwerk	WEEE-Richtlinie	ElektroG
Verwertung	80 % *	80 %
Recycling und Vorbereitung zur Wiederverwendung	70 % *, 80 % **	70 %

* gilt vom 15. August 2015 bis zum 14. August 2018

** gilt ab dem 15. August 2018

7.1.5 Verwertungswege und ihre Sekundärprodukte

In Deutschland werden in Erstbehandlungsanlagen zunächst Geräte entnommen, die für eine Vorbereitung zur Wiederverwendung geeignet sind. Die Erstbehandlung selbst wird durch teilautomatisierte oder manuelle Demontage realisiert [LCD-2016]. Dabei werden Fraktionen zur stofflichen und energetischen Verwertung sowie zur Beseitigung erzeugt, deren Verwertungswege nachfolgend beschrieben werden sollen.

Die Gehäusekunststoffe enthalten in der Regel Flammschutzmittel, etwa 40 % davon sind polybromierte Flammschutzmittel [Nunweiler-2016b]. Die belaste-

¹² Gesetz über das Inverkehrbringen, die Rücknahme und die umweltverträgliche Entsorgung von Elektro- und Elektronikgeräten [ElektroG]

¹³ Richtlinie 2012/19/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 4. Juli 2012 über Elektro- und Elektronikaltgeräte [EP ER-2012]

ten Kunststoffe können technisch-sensorisch detektiert [Nunweiler-2016a] und anschließend separiert werden. Eine stoffliche Verwertung dieser Kunststoffe muss, auch gemäß der RoHS¹⁴-Anforderungen für Flammschutzmittel- und Schwermetallkonzentration in Produkten, vermieden werden [Nunweiler-2016a], [EP ER-2003]. Für solche Gehäusekunststoffe gibt es einen Markt in Südostasien, die Verwertungswege sind hier unbekannt [Nunweiler-2016a], [LCD-2016]. Die Streuscheiben stellen nach der Demontage dagegen einen auch in Europa gut vermarktbar und recycelbaren Kunststoff dar [Elektrocycling-2015], [LCD-2016]. Die Polarisationsfolien werden dagegen energetisch verwertet [LCD-2016].

Die Metallrahmen und -gehäusebestandteile sowie die Leiterplatten und Kabel haben einen positiven Marktwert und werden geeigneten Recyclingwegen zugeführt. Hier kommt es, insbesondere bei den Leiterplatten, zum technologiebedingten Verlust von unedlen, in geringer Konzentration vorhandenen Metallen wie beispielsweise Vanadium, Beryllium oder Molybdän. Die Metalle Kupfer, Blei, Nickel, Zinn, Zink, Tellur, Selen sowie Edel- und Platingruppenmetalle können recycelt werden [Kawohl-2011], [Reuter-2013]. Der Kunststoffanteil der Leiterplatten wird im Schmelzprozess energetisch genutzt.

Recyclingverfahren für die Panels sind derzeit noch nicht großtechnisch verfügbar, so dass diese vorrangig energetisch verwertet bzw. thermisch beseitigt werden [Nunweiler-2016a], [LCD-2016]. Jedoch sind in mehreren Forschungsvorhaben bereits erfolgversprechende Ansätze entwickelt worden [Böni-2015], [Elektrocycling-2015], [Fröhlich-2015], [Sellin-2016]. Diesen zufolge ist die Indiumrückgewinnung ist zwar technisch möglich, aber durch die vergleichsweise geringe Konzentration und den geringen ökonomischen Wert dieses Metalls ist eine wirtschaftliche Ausgestaltung derzeit nicht absehbar [Elektrocycling-2015]. Außerdem spielt die Verwertung der arsenhaltigen Glasfraktion eine wichtige Rolle, für die derzeit eine kostenintensive Deponierung in Deponieklasse II erforderlich ist [Elektrocycling-2015]. Bei Neugeräten wird statt Arsen zwar Antimon eingesetzt [Nunweiler-2016a], ob dies jedoch ebenfalls einer Verwertung entgegensteht, ist noch unklar [Elektrocycling-2015].

Darüber hinaus existieren Ansätze für eine energetische und rohstoffliche Verwertung des Panels, die aber in Deutschland zurzeit nicht genutzt werden. So ist es technisch möglich, den Verbund in einem thermischen Entsorgungsverfahren für gefährliche Industrieabfälle einzusetzen, und damit Energieträger und Sand zu substituieren. Außerdem ist der Einsatz in einem metallurgischen Verfahren als Reduktionsmittel sowie Schlackebildner möglich [Scheiring-2015].

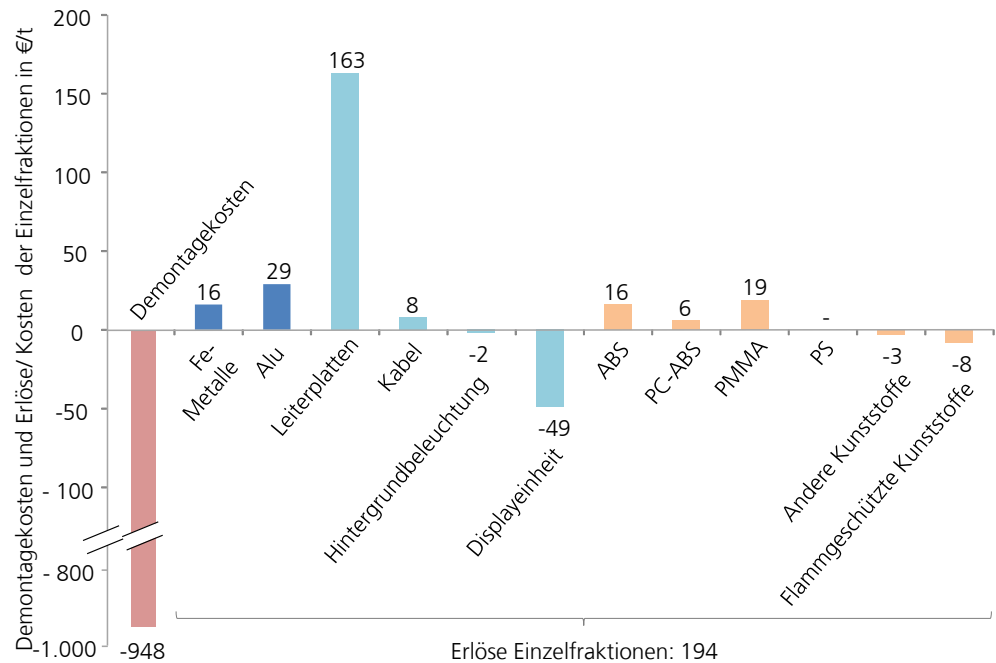
Die CCFL-Hintergrundbeleuchtung wird nach der Entnahme speziellen Aufbereitungsanlagen zugeführt. Hier können Glas und Metalle für das Recycling gewonnen werden. Auch eine Rückgewinnung des Leuchtpulvers [Nunweiler-2016a] sowie des Quecksilbers (Hg) ist möglich [Kranert-2013]. Die im Leuchtpulver enthaltenen Seltenerdmetalle können in technisch aufwändigen Prozessen zurückgewonnen werden. Für welchen Anteil des Leuchtpulvers dies statt der üblichen Deponierung durchgeführt wird, ist jedoch nicht bekannt. Wenn

¹⁴ RoHS = Restriction of Hazardous Substances

die Hintergrundbeleuchtung über LED realisiert wird und diese in der Erstbehandlung entnommen werden, ist ebenfalls eine Behandlung in der Altlampenaufbereitung möglich [Nunweiler-2016a].

Eine beispielhafte Übersicht der Erlöse und Kosten für Einzelfractionen aus einer manuellen Erstbehandlung sowie der Behandlungskosten für eine solche Erstbehandlung ist in Bild 7-5 dargestellt. Hier ist zu erkennen, für welche Fractionen der Erstbehandler Erlöse erzielen kann.

Bild 7-5:
Übersicht zu Kosten und Erlösen bei der manuellen Demontage von LCD-Flachbildschirmen in einer österreichischen Erstbehandlungsanlage im Jahr 2009 nach [Salhofer-2011]



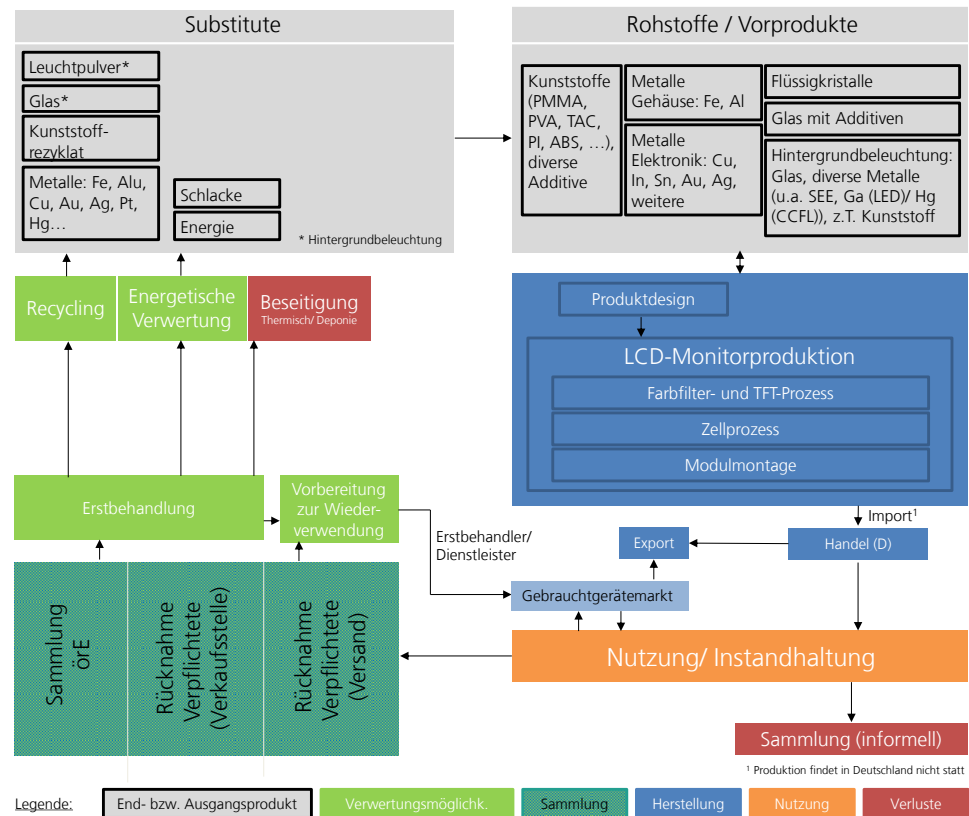
Insgesamt sind die Aufbereitungstiefe und damit die Qualität der Outputfractionen aus der Erstbehandlung stark abhängig von den Marktbedingungen (Wertstoff Erlöse, Entsorgungspreise) und variieren dementsprechend stark im zeitlichen Verlauf [Rotter-2015]. Grundsätzlich ist aber festzuhalten, dass bei einer händischen Demontage deutlich geringere Wertstoffverluste und die Erzeugung hochwertiger Fractionen zu verzeichnen sind [Reuter-2013]. Die recyclinggerechte Produktkonstruktion ermöglicht – beispielsweise durch Verwendung schnell lösbarer Verbindungselemente oder einheitlicher Verbindungsarten – eine Reduzierung von Demontagezeiten und -kosten [Bartnik-2014].

In Österreich und der Schweiz sind für die Erstbehandlung auch gekapselte Anlagen in Betrieb, in denen die Monitore zerkleinert und dann in verschiedene Materialfractionen sortiert werden. Dabei werden Eisenmetalle, der Leuchtstaub sowie gemischte Fractionen verschiedener Korngrößen gewonnen [Böni-2015]. Eine automatisierte Sortierung dieser Fractionen ist möglich, jedoch ist die Hg-Belastung gegenüber den Fractionen aus der nur teilautomatisierten Demontage erhöht. Belastungsgrenzwerte für ein Recycling (Österreich) werden aber unterschritten [Eppenberger-2011].

7.1.6 Stoffflüsse und Akteurskonstellationen

Die Wertschöpfungskette für LCD-Computerbildschirme ist in Bild 7-6 detailliert dargestellt.

Bild 7-6:
Stoffflüsse für LCD-
Computerbildschirme
(detailliert) nach [Ha-
berlag-2006], [Minami-
2007], [LCD-2016]



An erster Stelle des Stoffflusses bei LCD-Computerbildschirmen steht der Primärrohstoffabbau. Dieser umfasst beispielsweise den Abbau von Erzen zur Gewinnung von Metallen sowie von Erdöl zur Herstellung von Basischemikalien mit einer entsprechend hohen Anzahl globaler Akteure. Anschließend findet die Herstellung von Halbzeugen und Vorprodukten statt, welche von Kunststoffgranulat bis hin zu komplexen Vorprodukten wie beispielsweise bestückten Leiterplatten reichen können. Im Zulieferbereich ist weltweit ebenfalls eine hohe Anzahl an Akteuren vorhanden.

Die fünf Hersteller von Computerbildschirmen mit den weltweit größten Marktanteilen im ersten Quartal 2016 waren, in absteigender Reihenfolge, die US-amerikanischen Unternehmen Dell Technologies Inc. und HP Inc. (USA), die südkoreanischen Unternehmen Samsung Electronics und LG Electronics sowie AOC als Teil der chinesischen Holding TPV Technology [AOC-2016], [Statista-2016]. Produktionsstandorte in Europa sind nicht bekannt. Der Handel wird weltweit über die Hersteller selbst, den Elektronikfachhandel mit Verkaufsstellen sowie verschiedene Online-Handelsunternehmen durchgeführt.

Bei den Nutzern können private und geschäftliche Nutzer unterschieden werden. Ausgehend von den privaten Nutzern existiert ein Gebrauchtgütermarkt

im Inland, der vor allem über einschlägige Internetplattformen realisiert wird. Die darin befindlichen Geräte haben keinen Abfallstatus und werden daher nicht statistisch erfasst. Businessgeräte werden dagegen häufig geleast, gehen nach Ablauf des Leasingzeitraums in ein Refurbishment und werden danach im Ausland vertrieben. Große Hersteller (z. B. IBM) lassen Rücknahme und Refurbishment über Dienstleister wie beispielsweise die EARN Elektroaltgeräte Service GmbH erledigen [LCD-2016]. Diese Geräte haben ebenfalls keinen Abfallstatus. Eine unbekannte Menge an Gebrauchtgeräten wird nach der Nutzungsphase auch im Haushalt oder im Betrieb gelagert.

Zudem findet ein Export von Gebrauchtgeräten ins Nicht-EU-Ausland statt. Um den problematischen Export von nicht mehr gebrauchsfähigen Altgeräten zu unterbinden, wurde in der Novelle des ElektroG Ende 2015 eine Beweislastumkehr eingeführt, die einen Nachweis der Gebrauchsfähigkeit der Geräte gegenüber den kontrollierenden Behörden durch den Exporteur fordert [ElektroG-2015]. Zum Umfang des Exportes nach Einführung dieser Maßnahme stehen aktuell noch keine Daten zur Verfügung.

Altgeräte können durch den Nutzer (in haushaltsüblichen Mengen) bei Sammelstellen der öffentlich-rechtlichen Entsorgungsträger (ÖRE) sowie bei 12 710 Sammel- und Rücknahmestellen der Verpflichteten, von denen jedoch nur ein Teil auch Flachbildschirme entgegennehmen, abgegeben werden [Stiftung EAR-2016a]. An den Sammelstellen der ÖRE findet teilweise eine Vorbereitung zur Wiederverwendung statt, wenn ein Gebrauchtwarenhandel angeschlossen ist.

Hauptsächlich werden die Altgeräte in Deutschland aber zu einer der derzeit 356 registrierten Erstbehandlungsanlagen verbracht, von denen jedoch nur ein Teil auch Flachbildschirme behandelt [Stiftung EAR-2016b]. Dabei handelt es sich häufig um kleine und mittelständische Unternehmen; aber auch größere Firmen der Entsorgungsbranche wie ALBA, Remondis oder Veolia betreiben Erstbehandlungsanlagen. In diesen Anlagen findet dann ebenfalls eine Aussortierung von Geräten statt, die für eine Vorbereitung zur Wiederverwendung geeignet scheinen. Die Prüfung der Geräte und der inländische Verkauf werden zum einen durch die Erstbehandler selbst durchgeführt, was beispielsweise oft bei Werkstätten der Fall ist, die im Bereich der Lebenshilfe tätig sind. Zum anderen werden diese Tätigkeiten aber auch durch Dienstleister durchgeführt [LCD-2016]. Die Absatzmärkte dieser Gebrauchtgeräte liegen hauptsächlich im Ausland [LCD-2016].

Nach der Auftrennung der Monitore in verschiedene Fraktionen in der Erstbehandlung werden diese in Recycling- oder energetische Verwertungsverfahren verbracht. Ein wesentlicher Anteil wird dabei in Europa recycelt. Wie bereits erwähnt, werden einige Fraktionen, wie beispielsweise die Gehäusekunststoffe, aber auch ins Nicht-EU-Ausland exportiert [Nunweiler-2016a], [LCD-2016].

Uneinigkeit zwischen den Akteursgruppen besteht unter anderem bezüglich der Produktkennzeichnung (vgl. Forderungen Aktionsplan nach [EC-2015a]). So würde die Verfügbarkeit von Informationen über die Produktzusammensetzung die Erstbehandlung teilweise vereinfachen, zum Beispiel wenn bereits äußerlich erkennbar ist, ob die Hintergrundbeleuchtung LED- oder CCFL-basiert ist und

demnach Vorkehrungen zum Schutz vor Hg-Emissionen getroffen werden müssen oder nicht [LCD-2016]. Relevant für eine zeit- und damit kostenoptimierte Demontage wären auch Informationen zum Aufbau der Geräte. So wurde in Untersuchungen festgestellt, dass verschiedene Geräte des gleichen Herstellers, die sich äußerlich nicht voneinander unterscheiden, trotzdem unterschiedlich aufgebaut waren, was beispielsweise einem Wechsel von Zulieferern während der Herstellung einer Baureihe geschuldet sein kann [LCD-2016]. Dieser Informationsbedarf zu Zusammensetzung und Aufbau der Produkte steht jedoch dem Geheimhaltungsbedarf der Hersteller entgegen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass nur ein bestimmtes Maß an Informationen überhaupt relevant für die Gestaltung der Erstbehandlung und die Wahl von Verwertungswegen ist. Daher könnte eine diesbezügliche Abstimmung zwischen Betreibern von Erstbehandlungs- und Recyclinganlagen mit den Herstellern zum Abbau von bestehenden Barrieren führen. Auch ist die Frage einer einheitlichen und auslesbaren Kennzeichnungstechnik für alle in der Erfassung und Erstbehandlung benötigten Informationen derzeit technisch noch nicht final geklärt.

Hinsichtlich des recyclingfreundlichen Produktdesigns bestehen ebenfalls Zielkonflikte. So spielen die Produktsicherheit aber auch Herstellungskosten, Marketingaspekte und die Funktionalität des Produktes, besonders hinsichtlich der Wettbewerbsfähigkeit gegenüber Konkurrenten, eine wesentliche Rolle im Designprozess. Demgegenüber stehen Anforderungen an die Recycling-, Demontage- und Reparaturfähigkeit des Produktes, die mit den vorher genannten Bereichen nicht immer in Einklang zu bringen sind und sowohl in der Designphase als auch im Herstellungsprozess zusätzliche Kosten verursachen können, was die Motivation zum recyclingfreundlichen Design verringert.

7.1.7 Umweltwirkungen

Die Umweltwirkungen des Produktlebenszyklus von LCD-Monitoren wurden in verschiedenen Studien untersucht, z. B. [Bhakar-2015], [Böni-2015], [BMUB-2016], [Bunge-2016], [Eugster-2008], [Prakash-2011], [Socolof-2011]. In der Tendenz dieser Studien zeigt sich übereinstimmend, dass die Umweltbelastungen der Produktion und Nutzungsphase den Belastungen aus Entsorgung und Recycling unabhängig vom Entsorgungsweg deutlich überwiegen. So führen [Prakash-2011] z. B. folgende Belastungen für den Produktlebenszyklus eines durchschnittlichen 17-Zoll-Bildschirms auf (vgl. Tabelle 7-2).

Tabelle 7-2: Umweltbelastungen durch die Herstellung, Nutzung und Entsorgung von LCD-Bildschirmen [Prakash-2011]

Art der Umweltbelastung/Phase	Herstellung	Nutzung	Entsorgung
Kumulierter Energieaufwand [MJ/a]	1 177,00	2 155,06	48,00
Treibhausgaspotenzial [kg CO ₂ -Äq./a]	70,00	127,93	4,00
Versauerungspotenzial [kg SO ₂ -Äq./a]	0,32	0,17	0,008

Dabei verweisen die Autoren darauf, dass die Datenlage zu den Umweltauswirkungen der Herstellung und Entsorgung von Bildschirmen noch mangelhaft ist und dass auch der Kenntnisstand zu human- und ökotoxikologischen Aspekten noch unzureichend ist. Weiterhin können die Größenordnungen der Belastungen je nach Produktionsprozess und -standort erheblich variieren.

Für die Entsorgung von unzerlegten oder teilzerlegten Bildschirmen in Müllverbrennungsanlagen wird auf die den Anlagen zugeführten, erhöhten Hg-Frachten sowie die hohen Wertstoffverluste im Bereich kritischer Rohstoffe wie z. B. Indium (In) verwiesen [Böni-2011]. In Verbindung mit den geringen Heizwerten der Geräte ist dieser Entsorgungsweg daher als ungeeignet für LCD-Bildschirme zu bezeichnen.

Bei der mechanischen Aufbereitung von LCD-Modulen sind aus Sicht des Umwelt- und Gesundheitsschutzes insbesondere mögliche Hg-Emissionen zu berücksichtigen. Entsprechende Aufbereitungs- und Nachweisversuche haben ergeben, dass nur etwa ein Viertel des geschätzten Hg-Inputs in dem Prozess wiedergefunden werden konnten. Die erzeugten Wertstofffraktionen wiesen mit etwa 4 % des Hg-Inputs sehr geringe Kontaminationen auf, während der Rest des wiedergefundenen Hg der Feinfraktion zugeordnet werden konnte. Aufgrund der zu vermutenden gasförmigen Entweichung eines Großteils des Hg-Inputs sollten entsprechende Aufbereitungsaggregate daher unbedingt gekapselt und mit entsprechender Absaugung und Aktivkohlefilterung betrieben werden [Böni-2011], [Fröhlich-2015].

Untersuchungen zur Hg-Belastung bei manueller Zerlegung der Bildschirme zeigten dagegen Größenordnungen, die deutlich unterhalb der zulässigen Maximalen Arbeitsplatz-Konzentrationen (MAK-Werte) lagen, selbst wenn teilweise beschädigte Hintergrundbeleuchtungen vorlagen.

Wenig problematisch sind dagegen die in den Displays enthaltenen Flüssigkristalle. Untersuchungen im Auftrag des Umweltbundesamtes haben ergeben, dass diese weder akut toxisch, mutagen oder kanzerogen und nicht schädlich für aquatische Organismen sind. Das Bayerische Landesamt für Umwelt sieht daher keine besonderen Entsorgungsanforderungen bezüglich dieser Displayinhaltsstoffe [Beckmann-2009].

Aufgrund des geringen weltweiten Vorkommens sowie des zugleich stark steigenden Bedarfs an Indium für die Display-Technologien sowie die Photovoltaikindustrie, steht die Indiumrückgewinnung besonders im Fokus aktueller Forschungsarbeiten. Da Indium als Nebenprodukt der Zink (Zn)-Gewinnung anfällt, ist zum einen auch dessen Primärgewinnung im Zuge gesteigerter Zinkgewinnungen möglich. Auf der anderen Seite führt die Indiumgewinnung als Nebenprodukt der Zinkgewinnung dazu, dass die damit verbundenen Umweltbelastungen bilanziell der Zinkgewinnung angelastet werden. Eine Indiumrückgewinnung durch manuelle Demontage und Lösemittelextraktion ist daher bezüglich der Umweltbelastungen vergleichbar mit der Primärgewinnung. Wird die Erstbehandlung mit Schredder, automatischer Sortierung und Ionentauscherextraktion vorgenommen, schneidet die Sekundärgewinnung sogar deutlich negativer ab als die Primärgewinnung [Böni-2015]. Aufgrund der mangelnden Wirtschaftlichkeit der Indium-Rückgewinnung empfehlen die Autoren eine Zwi-

schenlagerung der LCD-Panels. Dies wird in der Praxis der Erstbehandlung aber als nicht sinnvoll erachtet, da Lagerflächen in den Betrieben eher knapp sind und in naher Zukunft kein Verwertungsweg in Sicht ist [LCD-2016].

7.1.8 Relevanz für Wirtschaft und Beschäftigung

Sowohl klassische Industriezweige als auch Hightech-Unternehmen haben einen hohen Bedarf an Industrie- und speziellen Technologierohstoffen. Betrachtet man die Kostenstruktur des produzierenden Gewerbes, wird deutlich, dass die Materialkosten den zentralen Kostenfaktor darstellen und auch die Kosten für Personal und Energie deutlich übersteigen. So liegen beispielsweise bei der Herstellung von Datenverarbeitungsgeräten, elektronischen und optischen Erzeugnissen die Materialkosten bei einem Anteil von 48,1 % [Destatis-2015].

Darüber hinaus verfügt Deutschland zwar über wichtige Rohstoffvorkommen (Kohle, Steine und Erden, Salze), ist jedoch insbesondere im Hinblick auf die genannten Technologierohstoffe nahezu vollständig auf Importe angewiesen und unterliegt somit auch den für diese Rohstoffe bestehenden Verfügbarkeits- und Versorgungsrisiken (Marktmechanismen, Protektionismus, Preisvolatilität, schwindende geogene Reserven etc.). Eine gezielte Rückgewinnung von Rohstoffen, die für die Industrie von besonderer Bedeutung sind, kann einen wichtigen Beitrag zur Rohstoffversorgung der Wirtschaft und somit zur Minimierung der Importabhängigkeit beitragen.

Doch auch für die Recyclingbranche selbst ist die Circular Economy von großer wirtschaftlicher Relevanz. So werden für den im Jahr 2014 in Europa angefallenen Abfallstrom der LCD-Computermonitore potenzielle Materialerlöse von 348 Millionen € genannt. Dabei werden 61 % der Erlöse im Recyclingprozess aus der Rückgewinnung von Gold, 19 % aus Kunststoffen, 8 % aus Palladium, 4 % aus Zinn, 3 % aus Stahl und 2 % aus dem Silberanteil generiert [Cucchiella-2015]. LCD-Computerbildschirme enthalten zwar eine Vielzahl an Technologiemetallen, jedoch zeigt eine auf derzeitigen Materialgehalten und aktuellen Rohstoffpreisen basierende Analyse, dass beim Recycling von LCD-Bildschirmen insbesondere kritische Elemente wie Indium, Neodym oder Tantal derzeit als wirtschaftlich nicht relevant eingestuft werden [Cucchiella-2015]. Die Marktpreise dieser Elemente liegen zwar beispielsweise deutlich über dem Preis von Palladium, ihre geringe Konzentration im Produkt ermöglicht derzeit dennoch kein wirtschaftliches Recycling.

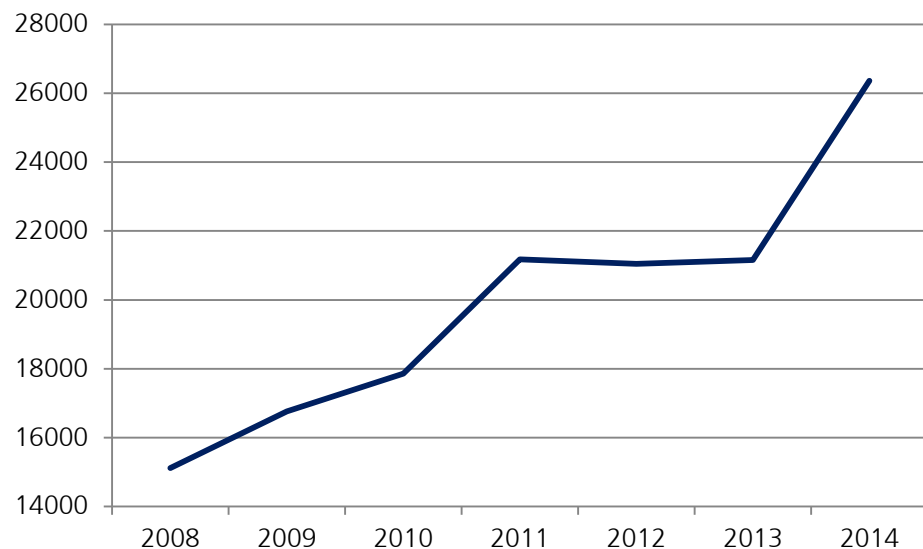
Unabhängig von den rein wirtschaftlichen Aspekten hätte eine Ausweitung bestehender Recyclingaktivitäten auf diese kritischen Rohstoffe jedoch bezüglich der Minimierung von Importabhängigkeiten und der Verringerung von Verfügbarkeitsrisiken in jedem Fall positive Effekte auf die Wirtschaft.

Belastbare Informationen zu Arbeitsplatzeffekten auszuweisen, die direkt dem Stoffstrom LCD-Monitore zuzuordnen sind, ist aufgrund der bestehenden Datenlage nicht möglich. Einerseits wird der Abfallstrom derzeit in aller Regel zusammen mit anderen Elektroaltgeräten (EAG) behandelt, weshalb sich ausgewiesene Arbeitsplatzeffekte bei bestimmten Unternehmen (z. B. [IHK-2011]) dann auch auf den gesamten Stoffstrom beziehen und nicht auf LCD-Monitore. Andererseits bildet die explizite Nennung solcher, auf das Recycling

von EAG bezogenen Angaben zur Schaffung von Arbeitsplätzen eher die Ausnahme, was auch eine Ableitung von Beschäftigungseffekten, die auf EAG-Recycling basierten, erschwert. Aus diesem Grund können nachfolgend nur allgemeine Aspekte der Recyclingbranche berücksichtigt werden.

Das Statistische Bundesamt erfasst jährlich Beschäftigte, Umsatz, Produktionswert und Wertschöpfung der Unternehmen in der Energie und Wasserversorgung in Deutschland und weist im Rahmen dieser Statistik auch Beschäftigtenzahlen für den Wirtschaftszweig WZ08-383 »Rückgewinnung« aus [Destatis-2016]. Das nachfolgende Bild 7-7 belegt dass die Beschäftigtenzahlen seit Beginn der Datenerhebung im Jahr 2008 kontinuierlich und deutlich ansteigen, wobei in dieser Statistik nur Unternehmen mit einer Beschäftigtenzahl von mehr als 20 Mitarbeitenden Berücksichtigung finden.

Bild 7-7:
Beschäftigte des WZ08-383 »Rückgewinnung«
im Zeitraum von 2008 - 2014 [Destatis-2016]



Beim betrachteten Wirtschaftszweig handelt es sich dabei ausschließlich um Unternehmen, die sich mit Rückgewinnungsprozessen befassen. Die Sammlung von Abfällen sowie die Abfallbehandlung oder -beseitigung werden über separate Wirtschaftszweige (WZ08-381 und WZ08-382) abgebildet.

Ein ebenfalls deutliches Beschäftigungswachstum im Bereich des Recyclings kann auf europäischer Ebene verzeichnet werden. So weist die European Environment Agency für den Zeitraum von 2000-2008 eine jährliche Wachstumsrate der Beschäftigtenzahlen von 10,6 % für den Bereich »Recycled Materials« aus [EEA-2011].

Grundsätzlich kann jedoch festgehalten werden, dass sich ein Recycling deutlich positiver auf Beschäftigungseffekte auswirkt als eine Verbrennung oder Deponierung von Abfällen. Dies gilt sowohl für die Anzahl, aber auch für die Löhne und Gehälter der geschaffenen Arbeitsplätze [EEA-2011], [FOE-2010], [Neitsch-2016].

Darüber hinaus zeigen Schätzungen der [FOE-2010], dass ein Recycling von EAG im Vereinigten Königreich (UK) im Vergleich zu anderen Abfallströmen

wie beispielsweise Kunststoffen, Glas, Stahl oder Grünabfällen mit 40 Arbeitsplätzen (AP) je 1 000 Tonnen Material grundsätzlich das höchste Potenzial für Arbeitsplatzzuwächse aufweist (im Vergleich: Kunststoffe 15,6 AP/1 000 Tonnen, Glas 0,75 AP/1 000 Tonnen, Stahl 11 AP/1 000 Tonnen, Grünabfälle 1,3 AP/1 000 Tonnen).

7.2 Potenziale einer Circular Economy für LCD-Computerbildschirme

7.2.1 Technologische, ökonomische und ökologische Grenzen der Circular Economy

In der Regel ist hochwertiges Recycling von Metallen, Kunststoffen und ähnlichen Materialien gegenüber der Primärgewinnung **ökologisch** vorteilhaft. Beispielsweise werden beim Aluminiumrecycling je einzelne Tonne gewonnenem Sekundäraluminium nur 4,4 Tonnen Rohstoffe verbraucht. In der Primärgewinnung sind es dagegen ganze 26,4 Tonnen [Hiebel-2015]. Ob ein ökologischer Vorteil durch eine Kreislaufführung von Materialien aus dem Abfall besteht und vor allem, wie hoch dieser ausfällt, hängt davon ab, mit welchen Umweltwirkungen Primär- und Sekundärrohstoffgewinnung verbunden sind. Je höher die Umweltbelastungen durch die Primärgewinnung und je geringer die Umweltbelastungen bei der Sekundärgewinnung, desto vorteilhafter ist ein Recycling. Daher ist festzuhalten, dass grundsätzlich für jeden Sekundärrohstoff und jede Abfallart ein ökologisch optimaler Rückgewinnungsgrad existiert [Bunge-2016]. Besonders relevant ist dies im Fall der LCD-Computerbildschirme für die enthaltenen Spurenmetalle, da die Anreicherung der in geringen Konzentrationen enthaltenen Stoffe nur mit einem vergleichsweise hohen Aufwand erreicht werden kann. So sind für das Element Indium wie bereits erwähnt die ökologischen Vorteile des Recyclings aus Monitoren sehr gering [Böni-2015]. Wenn jedoch der Recyclinganteil in der globalen Zinkproduktion steigt, könnten sich die ökologischen Auswirkungen der Primärgewinnung des Indiums verschlechtern, was wiederum das Indiumrecycling ökologisch vorteilhafter werden lässt.

Eine weitere ökologische Grenze ist im Bereich der Kunststoffe festzustellen. Schadstoffbelastete Kunststoffkomponenten sollten gemäß der RoHS-Anforderungen für Flammschutzmittel- und Schwermetallkonzentration in Produkten aus ökologischer Sicht energetisch oder rohstofflich verwertet werden [Nunweiler-2016a], [EP ER-2003]. Entsprechende Technologien zur Abtrennung flammenschutzmittelbelasteter Kunststoffe in der mechanischen Aufbereitung bzw. Erstbehandlung existieren [Nunweiler-2016a], so dass eine Separation technisch möglich ist.

Aus **ökonomischer** Sicht sind darüber hinaus auch Grenzen für höhere Stufen der Abfallhierarchie, nämlich die Vorbereitung zur Wiederverwendung und die Abfallvermeidung, zu verzeichnen. So wird die Wiederverwendung von Altgeräten im Inland durch ihren geringen Wiederverkaufswert behindert [NMU-2011]. In Zusammenhang mit den entstehenden Personalkosten für die Überprüfung der Produktsicherheit und gegebenenfalls sogar Reparatur durch eine Fachkraft sind die ökonomischen Anreize für eine Vorbereitung zur Wiederverwendung im Inland mutmaßlich eher gering. Nach Expertenaussagen besteht hier jedoch ein Markt im Ausland [LCD-2016]. Im Hinblick auf die Produktnutzungsdauer von LCD-Computerbildschirmen weisen diese Expertenaussagen

zufolge Schwachpunkte im Bereich der häufig nicht ausreichend hitzebeständigen Elektrolyt-Kondensatoren auf [Ebelt-2006], [LCD-2016]. Ob diese Kondensatoren aus ökonomischen Gesichtspunkten beim Gerätedesign ausgewählt werden, ist allerdings nicht bekannt. Zusätzlich spielt bei der Produktnutzungsdauer auch der technische Fortschritt eine Rolle, der Nutzer zum Kauf eines Neugerätes animieren kann (vgl. Untersuchung zur Nutzungsdauer von TV-Bildschirmgeräten in [Prakash-2015]).

Bezüglich der Gestaltung der Erstbehandlung wurde bereits erwähnt, dass hier der notwendige Aufbereitungsaufwand immer dem monetären Erlös gegenübersteht, der für eine bestimmte Qualität der erzeugten Fraktionen erzielt werden kann. Derzeit erfordern die Rückläufe an Monitoren mit Hg-haltiger Hintergrundbeleuchtung aus Gründen des Gesundheitsschutzes und entsprechenden rechtlichen Vorschriften eine vergleichsweise aufwändige Erstbehandlung, die manuell oder teilautomatisiert erfolgt und bei der hochwertige Fraktionen gewonnen werden können. Perspektivisch wird der Anteil an Geräten mit CCFL-Hintergrundbeleuchtung im Abfallstrom aber sinken. Wird aufgrund des geringen Schadstoffgehaltes eine rein mechanische Aufbereitung ermöglicht, würde dies weniger reine Fraktionen und höhere Verluste an in geringen Konzentrationen vorhandenen Metallen nach sich ziehen [Reuter-2013], [LCD-2016].

Auch aus ökonomischer Sicht gibt es zudem Grenzen für das Indiumrecycling, da derzeit kein wirtschaftliches Verfahren für die Rückgewinnung aus LCD-Computerbildschirmen bekannt ist [Elektrocycling-2015], [Nunweiler-2016a], [LCD-2016]. Zusätzlich wirken sich auch Preisschwankungen am Metallmarkt, der geringe Kenntnisstand über Metallgehalte in den Abfällen sowie das Risiko der Substitution oder Reduktion von Indium in den Produkten bei steigenden Indiumpreisen [Jalapoor-2013] negativ auf Investitionsentscheidungen aus. Eine aus ökologischer Sicht möglicherweise sinnvolle Zwischenlagerung der Displays [Böni-2015] mit der Aussicht, dass in absehbarer Zeit ein wirtschaftliches Verfahren zur Verfügung steht, wird aus Expertensicht wegen der Belegung von Lagerflächen und der geringen Aussicht auf in naher Zukunft entstehende Verwertungswege mit entsprechenden Kapazitäten als nicht sinnvoll eingeschätzt [LCD-2016].

Des Weiteren gibt es **organisatorische** Aspekte, die die Circular Economy behindern. So kommt es bei Erfassung und Transport häufig zu Beschädigungen, die eine spätere Wiederverwendung unmöglich machen und die Erstbehandlung erschweren [Schnepel-2016], [LCD-2016]. Die Zuständigkeiten und möglichen Maßnahmen für eine Verbesserung der Situation sind zwischen den erfassenden öRE und den Erstbehandlern derzeit strittig [Krafzig-2016]. Eine stärkere Kontrolle der Erfassung bei den öRE durch Fachpersonal würde zu deutlich höheren Erfassungskosten führen. Im Bereich der Vorbereitung zur Wiederverwendung führt zudem die mangelnde Verfügbarkeit von Ersatzteilen und die Zunahme der Gerätekomplexität zu organisatorischen und ökonomischen Hindernissen [LCD-2016]. Auch die Produkthaftung für Geräte, die dem Abfallstrom entnommen und als Gebrauchtgerät wieder in den Markt gebracht werden, ist rechtlich noch nicht vollständig geklärt [NMU-2011] und stellt somit ein Hemmnis dar.

Wesentliche **technologische** Grenzen konnten für den Stoffstrom LCD-Computerbildschirme bei den Recherchen für diese Studie nicht identifiziert werden. Bestehende Materialverluste in der Erstbehandlung könnten durch einen ökonomisch-aufwändigen händischen Demontageprozess minimiert werden. Verluste in den nachgeordneten Recyclingverfahren, beispielsweise von unedlen Technologiemetallen auf Leiterplatten im Kupferschmelzprozess, wären theoretisch durch eine ökologisch wie ökonomisch sehr aufwändige Rückgewinnung dieser Metalle aus den anfallenden Rückständen minimierbar.

7.2.2 Innovationspotenziale und Geschäftsmodelle der Circular Economy

Als vorteilhaft für die Erzeugung hochwertiger Aufbereitungsfraktionen für ein Recycling können die Aspekte demontagefreundliches Design [Rotter-2013] und Systeme zur Übertragung recycling- und demontagerelevanter Informationen gesehen werden. Zur Verbesserung der Demontagefähigkeit könnten beispielsweise »smart materials« zum Einsatz kommen. Dabei handelt es sich um schaltbare Materialien, bei denen eine gezielte Änderung der Eigenschaften beispielsweise durch Licht, Magnetismus oder Wärme hervorgerufen werden kann, die dann für Demontagezwecke genutzt werden können.

Für die Klebstoffindustrie ergeben sich in der Circular Economy Geschäftsmodelle für reversible Klebsysteme, die ein Recycling zu ermöglichen. Dazu müssten die Anforderungsprofile an die Klebstoffe angepasst werden. Ein Lösen von geklebten Bauteilen auf Leiterplatten kann z. B. mit heißem Wasser erfolgen [Göllner-2012]. Eine andere Variante ist das »Entkleben auf Knopfdruck« mittels Wärme und elektrischer Gleichspannung [IFAM-2006]. Damit der Recycler die nötigen Informationen über das Material und mögliche Verfahren zur Lösung der Verbindungen bekommt, muss der Materialfluss parallel von einem entsprechenden Informationsfluss begleitet werden.

Zur Kennzeichnung der Bauteile könnten z. B. bestehende chemische Markierungssysteme genutzt werden. Diese chemischen Molekülmarker oder Mikrofarbcodesysteme werden derzeit zum Schutz vor Produktpiraterie eingesetzt [LCD-2016]. Sie könnten zukünftig zur Stoffkennzeichnung und Angabe von Demontagevorschriften genutzt werden. Dafür wäre jedoch eine Kopplung mit geeigneten Auslesesystemen erforderlich.

Der Einsatz chemischer Marker zur Verbesserung der Sortierfähigkeit und zur Detektion und Separation von Additiven zur Verbesserung der Rezyklatqualität ist ebenfalls denkbar [WEF-2016].

Ein bereits länger vorhandener Trend ist in Leasing und Sharing-Modellen zu sehen, die besonders im geschäftlichen Bereich häufig umgesetzt sind. Die Geräte werden nach Ablauf des Leasingzeitraumes häufig für einen zweiten Markt im Ausland bereitgestellt [LCD-2016], was damit möglicherweise auch zur Abfallvermeidung beiträgt.

Ein möglicher Einfluss des Aktionsplans im Kreislaufwirtschaftspaket könnte in einem zukünftig verstärkten Einsatz biobasierter Materialien [EC-2015a] zu sehen sein, der bei LCD-Computerbildschirmen beispielsweise durch Gehäuse aus biobasierten Kunststoffen wäre. Inwieweit Biokunststoffe in diesen Anwen-

dungen Umweltvorteile bieten müsste ökobilanziell geprüft werden. Generell wurde der Einfluss des Kreislaufwirtschaftspaketes in den Experteninterviews als eher gering eingeschätzt [LCD-2016].

7.2.3 Politische und regulatorische Hemmnisse für die Circular Economy

Die in der europäischen WEEE-Richtlinie und dem deutschen ElektroG festgeschriebenen massenbezogenen Recyclingquoten [ElektroG-2015], [EP ER-2012] führen im positiven Sinne dazu, dass enthaltene Massenrohstoffe wie Kunststoffe oder Metalle wie Aluminium, Eisen oder Kupfer einem Recycling zugeführt werden. Zusätzlich ist die Separation von Metallen und kupferhaltigen Komponenten wie Leiterplatten auch ökonomisch vorteilhaft. Dieser finanzielle Anreiz besteht jedoch für die nur in geringen Konzentrationen enthaltenen Sondermetalle nicht, so dass diese aufgrund fehlender ökonomischer Anreize und rechtlicher Zwänge in der Regel nicht zurückgewonnen werden.

Durch den Bezug der Quoten auf den Input der Verwertungs-/Recyclinganlagen werden Verluste, die im Recyclingprozess selbst auftreten, nicht berücksichtigt. Dadurch gibt es aus rechtlicher Sicht keine Reglementierungen für die Mindestqualitäten für Fraktionen aus der Erstbehandlung. Dies zeigt sich beispielsweise bei den flammschutzmittelbehafteten Kunststoffen, die häufig in einem Gemisch mit nicht-flammschutzmittelbehafteten Kunststoffen in Verwertungswege im Ausland gehen, für die keine hochwertige Aufbereitung garantiert werden kann [LCD-2016].

7.2.4 Notwendige Rahmenbedingungen und Impulse zur Umsetzung der Circular Economy

Wie bereits erwähnt, würde eine recycling- und reparaturfreundlichere Produktgestaltung einen positiven Einfluss auf Abfallvermeidung und Recycling ausüben. Anreize könnten beispielsweise über die Produzentenverantwortung ermöglicht werden, indem die damit verbundenen finanziellen Beiträge der Hersteller und Importeure an die Wiederverwendbarkeit oder Recyclbarkeit der Produkte gekoppelt werden. Vorteilhaft wäre darüber hinaus eine Verringerung der im Erfassungs- und Transportprozess der Altgeräte entstehenden Beschädigungen [LCD-2016].

Generell wird bei den Befragten eine Verbesserung der Kommunikation zwischen Herstellern und Erstbehandlern beziehungsweise Verwertern als zielführend empfunden, um weitere Fortschritte in der Circular Economy erreichen zu können [LCD-2016]. Dazu gehört auch die abgestimmte Entwicklung geeigneter Kennzeichnungssysteme [LCD-2016].

Die Qualität der Erstbehandlung orientiert sich derzeit hauptsächlich an den Anforderungen der bestehenden Recyclingquoten nach ElektroG bzw. WEEE-Richtlinie und ökonomischen Anreizen für Wertstoff Erlöse. Innerhalb der dadurch vorgegebenen Grenzen sind jedoch zum Teil hohe Spannbreiten in der Aufbereitungsqualität möglich. Die in Deutschland geplante Behandlungsverordnung soll hier einheitliche Vorgaben für eine hochwertige Behandlung vorschreiben [UBA-2015]. Je nach Ausmaß der darin festgeschriebenen Anforder-

rungen kann dies zu einer Verbesserung und Vergleichmäßigung der Qualität der Aufbereitungsfractionen führen.

7.3 Zusammenfassung Stoffstrom LCD-Computerbildschirme

Bei Flachbildschirmen handelt es sich um komplex aufgebaute Produkte, die einen hohen Wertstoff- aber teilweise auch relevanten Schadstoffgehalt aufweisen. In der Erstbehandlung der Geräte, deren Ausgestaltung stark von der Notwendigkeit zur Schadstoffentfrachtung bestimmt ist, wird eine Vielzahl an für ein hochwertiges Recycling geeigneter Fraktionen wie Eisen- und Aluminiummetalle oder Leiterplatten erzeugt. Für die Kunststofffraktion ist ein Recycling durch die Belastung mit Flammschutzmitteln nur für einen Teilstrom sinnvoll. Enthaltene strategisch wichtige Metalle, bei LCD-Bildschirmen besonders Indium, werden aufgrund fehlender Verwertungsstrukturen und ökonomischer Anreize derzeit nicht zurückgewonnen. Indium wird neben LCD-Bildschirmen auch in Legierungen und Loten, Photovoltaik-Modulen sowie Leucht- und Laserdioden eingesetzt [Christman-2014], [EC-2016], und ist daher als Rohstoff für die europäische Industrie relevant, auch wenn in der EU keine Produktionsstandorte für LCD-Computerbildschirme angesiedelt sind.

Auch bezüglich der Vorbereitung zur Wiederverwendung bestehen relevante Hemmnisse, beispielsweise durch die Beschädigung bei der Erfassung oder Ersatzteilmangel. Durch Maßnahmen wie ein recyclingfreundlicheres Produktdesign und eine verbesserte Produktkennzeichnung könnten bestehende Hemmnisse abgebaut und die Circular Economy für LCD-Computerbildschirme weiterentwickelt werden.

8 Einfluss des EU-Kreislaufwirtschaftspakets auf die Circular Economy

8.1 Definitionen Begrifflichkeiten

Um in der Studie durchgängig die gleichen Begrifflichkeiten zu verwenden und diese nachvollziehbar zu gestalten, wurde ein umfangreiches Glossar erstellt (siehe Kapitel 11). Das Glossar umfasst dabei sowohl die Erläuterung und Abgrenzung der im Text verwendeten Begrifflichkeiten als auch die Erläuterung von Verordnungen, Richtlinien und Gesetzen auf die im Text Bezug genommen wird.

Historie und Motivation

Am 2. Juli 2014 hat die Kommission der Europäischen Union unter Kommissionspräsident José Manuel Barroso ein Richtlinienpaket zur Kreislaufwirtschaft (Towards a Circular Economy: a zero waste programme for Europe) verabschiedet [EU-KOM-2014]. Das Paket wurde seitens der Kommission umfassend mit den ökonomischen und ökologischen Vorteilen einer ressourcenschonenden Kreislaufwirtschaft für ein nachhaltiges Wachstum begründet. Es nahm Bezug auf die Agenda für Ressourceneffizienz im Rahmen der Strategie »Europa 2020« für intelligentes, nachhaltiges und integratives Wachstum [EU-KOM-2010], die »Leitinitiative für ein ressourcenschonendes Europa« [EU-KOM-2011] sowie das 7. Umweltaktionsprogramm der EU [EP ER-2013]. Das übergreifende Ziel des Richtlinienpaketes bestand in der effektiven Wiederverwendung sowie dem Recycling von im Abfall enthaltenen Wertstoffen sowie deren Zuführung zur europäischen Wirtschaft. Dieses übergeordnete Ziel sollte durch eine Vereinfachung des EU-Abfallrechts, eine Verbesserung der Überwachung der Zielerreichung durch die Mitgliedstaaten und eine Nachjustierung der Zielvorgaben für Wiederverwendung und Recycling von Siedlungsabfällen und Verpackungsabfällen sowie einen schrittweisen Ausstieg aus der Deponierung verwertbarer Siedlungsabfälle erreicht werden.

Das Richtlinienpaket wurde von der EU-Kommission unter dem neuen Kommissionspräsidenten Jean-Claude Juncker am 7. März 2015 offiziell zurückgezogen und sollte der Begründung der Kommission zufolge durch einen neuen, ehrgeizigeren Vorschlag ersetzt werden. In diesem soll nicht nur die Abfallphase, sondern der gesamte Produktlebenszyklus berücksichtigt werden. Weiterhin soll die unterschiedliche Ausgangssituation der Mitgliedstaaten berücksichtigt werden. Durch eine Stärkung der Kreislaufwirtschaft sollen Ressourcen geschont und Stoffe in den Wirtschaftskreislauf zurückgeführt werden. Der EU-Kommission zufolge soll damit der Wert von Produkten, Stoffen und Ressourcen innerhalb der Wirtschaft länger erhalten und möglichst wenig Abfall erzeugt werden. Unternehmen sollen damit zugleich vor Ressourcenknappheit und steigenden Rohstoffpreisen geschützt werden. Weitere Intention des Richtlinienpaketes ist eine Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit der EU, die mit neuen Geschäftsmöglichkeiten, der damit verbundenen Entstehung von Arbeitsplätzen, sinkenden Energieverbräuchen und CO₂-Emissionen sowie der Vermeidung irreversibler Umweltschäden begründet wird [EC-2015a].

Nach einem Entschließungsantrag des Europäischen Parlamentes vom 9. Juli 2015 [Enquete-2015a] an die Europäische Kommission wurde der neue Vorschlag in Form eines Aktionsplans der EU für die Kreislaufwirtschaft am 2. Dezember 2015 vorgelegt [EC-2015a]. Zusammen mit dem Aktionsplan wurden Legislativvorschläge für Abfälle vorgelegt, die der langfristigen Verringerung der Abfallablagerung auf Deponien sowie der Verbesserung der Vorbereitung zur Wiederverwendung und des Recyclings wichtiger Abfallströme dienen sollen [EC-2015a]. Der Aktionsplan enthält Maßnahmen auf allen Wertschöpfungsstufen.

Der Legislativvorschlag umfasst Änderungen an folgenden Richtlinien:

- Richtlinie 2008/98/EG über Abfälle
- Richtlinie 94/62/EG über Verpackungen und Verpackungsabfälle
- Richtlinie 1999/31/EG über Abfalldeponien
- Richtlinie 2012/19/EU über Elektro- und Elektronik-Altgeräte
- Richtlinie 2000/53/EG über Altfahrzeuge
- Richtlinie 2006/66/EG über Batterien und Akkumulatoren sowie Altbatterien und Alttakkumulatoren

Eine Auswahl konkret enthaltener Forderungen des Aktionsplans sowie der Legislativvorschläge werden im folgenden Kapitel 8.2 genauer beschrieben.

8.2 Forderungen und Entwicklungen

Nachfolgend werden die für die Studie relevanten konkreten Forderungen aus dem Aktionsplan der EU für die Kreislaufwirtschaft 2015 sowie aus den Legislativvorschlägen aufgezeigt. Sowohl von Seiten des Umweltausschusses als auch des Wirtschaftsausschusses des Europäischen Parlaments wurden bereits Änderungsvorschläge zum Aktionsplan und den Legislativvorschlägen erarbeitet, in denen zahlreiche Vorgaben der Kommission konkretisiert wurden. Da zum jetzigen Zeitpunkt jedoch nicht abgeschätzt werden kann, welche dieser Vorschläge in das finale Papier einfließen werden, bleiben sie in den folgenden Ausführungen zunächst unberücksichtigt.

8.2.1 Produktion und Produktgestaltung

Die Gestaltung von Produkten und Verpackungen hat Einfluss auf deren Wiederverwendbarkeit und Rezyklierbarkeit. Der Aktionsplan der EU-Kommission sieht daher vor, in der Ökodesign-Richtlinie (2009/125/EG) [EP ER-2009a] neben den bisher im Vordergrund stehenden Anforderungen an die Energieeffizienz künftig auch Anforderungen an die Reparierbarkeit, Langlebigkeit, Nachrüstbarkeit oder Rezyklierbarkeit von Produkten festzulegen. Weiterhin sollen Material- und Stoffkennzeichnungen in Produkten geregelt werden. In einem ersten Schritt will die Kommission im Rahmen der Ökodesign-Richtlinie verbindliche Vorschriften für die Gestaltung und Kennzeichnung von Produkten vorschlagen, die die Demontage, Wiederverwendung und das Recycling von Fernsehern und Bildschirmen leichter und sicherer machen sollen. Im Ökodesign-Arbeitsplan (2015-2017) sollen Ökodesign-Vorschriften für weitere Pro-

duktgruppen erarbeitet werden. Zur Förderung der Langlebigkeit wird geprüft, ob bei bestimmten Produkten Informationen über Reparaturmöglichkeiten z. B. durch Online-Reparaturanleitungen oder die Verfügbarkeit von Ersatzteilen vorgeschrieben werden können. Weiterhin ist ein unabhängiges Prüfprogramm zur Erkennung vorsätzlicher Obsoleszenz geplant [EC-2015a].

8.2.2 Verbrauch

Verbraucher und Konsumentenentscheidungen haben maßgeblichen Einfluss auf die Kreislaufwirtschaft. Die Verbrauchsphase ist ausschlaggebend für das Aufkommen und die Zusammensetzung sowie die Vermeidung und Minimierung von Abfällen. Die EU-Kommission prüft daher Möglichkeiten einer transparenteren Kommunikation von produktbezogenen Umweltinformationen einschließlich der Langlebigkeit von Produkten. Innovative Formen des Konsums, wie z. B. der Konsum von Dienstleistungen anstelle von Produkten sollen gefördert werden. Die Kommission will ein umweltgerechtes öffentliches Beschaffungswesen fördern und dazu Aspekte wie Langlebigkeit und Reparierbarkeit bei der Festlegung oder Überarbeitung von Kriterien berücksichtigen [EC-2015a].

8.2.3 Abfallbewirtschaftung

Die EU-Kommission hat neue Legislativvorschläge für Abfälle vorgelegt, um das stoffliche Recycling zu steigern und die Deponierung von Siedlungsabfällen einzuschränken. Nachfolgend werden relevante Änderungen der oben genannten Richtlinien aufgeführt, die Einfluss auf Recycling und Deponierung haben.

Richtlinie 2008/98/EG über Abfälle [EC-2015c]

Abfallvermeidung

Der Legislativvorschlag fordert die Mitgliedstaaten auf, die Verwendung langlebiger, reparierbarer oder recyclingfähiger Konsumgüter zu fördern, die Wiederverwendung von Elektro- und Elektronik-Altgeräten, Textilien und Möbeln zu unterstützen und die Verschwendung von Lebensmitteln zu verringern.

Verwertung

Die Mitgliedstaaten werden aufgefordert, Maßnahmen zur Förderung der Wiederverwendung zu ergreifen und die Errichtung von Wiederverwendungs- und Reparaturnetzen zu unterstützen. Dabei ist diesen Netzen der Zugang zu Abfallsammelstellen zu erleichtern.

Systeme der gesteigerten Produzentenverantwortung sind nicht verpflichtend, jedoch werden in einem neuen Art. 8a Anforderungen an Systeme definiert, sofern sie bestehen. Demnach ist sicherzustellen, dass die Hersteller die gesamten Kosten der Abfallbewirtschaftung tragen, die durch die von ihnen in Verkehr gebrachte Produkte entstehen (Art. 8a, Abs. 4a). Weiterhin sind die finanziellen Beiträge der Produzenten an der Wiederverwendbarkeit oder Rezyklierbarkeit ihrer Produkte zu bemessen (Art. 8a, Abs. 4b).

Bau- und Abbruchabfälle sind gemäß Legislativvorschlag der Europäischen Kommission bis 2020 unverändert zu mindestens 70 Gew.-% zur Wiederverwendung vorzubereiten, zu recyceln oder zu verfüllen (Art. 11, Abs. 2b).

Siedlungsabfälle sind bis 2025 unverändert zu mindestens 60 Gew.-% zur Wiederverwendung vorzubereiten oder zu recyceln.

Sah die Richtlinie bisher bereits die Einführung der getrennten Sammlung von Papier, Metallen, Kunststoffen und Glas bis 2015 vor (Art. 11, Abs. 1 ARRL), so legt der Legislativvorschlag nun auch verbindlich die getrennte Sammlung von Bioabfällen fest (Art. 22). Diese ist in Deutschland bereits über das Kreislaufwirtschaftsgesetz geregelt [KrWG-2012].

Bestimmung der Recyclingquoten

Die Quoten sind als Input des einem abschließenden Recyclingverfahren zugeführten Stoffstroms zu ermitteln.

Richtlinie 1999/31/EG über Abfalldeponien [EC-2015e]

Ziele für die Deponierung (Artikel 5)

Die Menge der auf Deponien abgelagerten Siedlungsabfälle ist bis 2030 auf 10 % des gesamten Siedlungsabfallaufkommens zu verringern (Art. 5, Abs. 5). Die Kommission prüft bis Ende 2024, ob das Ziel herabgesetzt werden soll und ob auch die Ablagerung anderer Abfälle eingeschränkt werden sollte (Art. 5, Abs. 7).

Mit Ergänzung des Artikel 5 um den Absatz 3f in der Deponierichtlinie wird im Legislativvorschlag darüber hinaus festgelegt, dass alle gemäß Art. 11 Abs. 1 und Art. 22 ARRL (Abfallrahmenrichtlinie) getrennt zu sammelnden Abfälle nicht mehr auf Deponien angenommen werden dürfen. Folglich dürfen damit nur noch inerte, nicht verwertbare Abfälle deponiert werden [Maurer-2016].

Im Legislativvorschlag werden Fristverlängerungen für konkret benannte Länder eingeräumt, die noch sehr hohe Deponierungsquoten aufweisen.

Eine Zielvorgabe zur Begrenzung des Anteils der deponierten Siedlungsabfälle war in der bisherigen Richtlinie nicht enthalten. Gestaffelte Zielvorgaben bestanden bislang nur für die Verringerung der Ablagerung biologisch abbaubarer Abfälle.

Richtlinie 94/62/EG über Verpackungen und Verpackungsabfälle [EC-2015d]

Ziele für die Verwertung

Bis Ende Dezember 2025 sind gemäß Legislativvorschlag der Kommission (Art. 6, Abs. 1) mindestens 65 Gew.-% aller Verpackungsabfälle zur Wiederverwendung vorzubereiten und zu recyceln. Bis Ende Dezember 2030 sind mindestens 75 Gew.-% aller Verpackungsabfälle zur Wiederverwendung vorzubereiten und zu recyceln. Gegenüber der Richtlinie 2004/12/EG zur Änderung der Richtlinie 94/62/EG über Verpackungen und Verpackungsabfälle wurden die Quo-

tenvorgaben für die einzelnen Packstoffe im Legislativvorschlag teilweise deutlich angehoben (vgl. Tabelle 8-1).

Tabelle 8-1: Recyclingquoten der geltenden Verpackungsrichtlinie (RL 2004/12/EG) im Vergleich mit dem Legislativvorschlag der Europäischen Kommission sowie dem Umweltausschuss des Europäischen Parlamentes [EC-2015d]

	Recycling [%]	Recycling nach Packstoffen					Wieder- verwen- dung
	Σ Verpa- ckungen	Glas	PPK ¹⁵	Metall	Kunst- stoffe	Holz	Σ Verpa- ckungen
RL 2004/12/EG	55 - 80	60	60	50	22,5	15	k.A.
Legislativvor- schlag für 2025	65	75	75	75	55	60	k.A.
Legislativvor- schlag für 2030	75	85	85	85	55	75	k.A.

Richtlinie 2012/19/EU über Elektro- und Elektronik-Altgeräte

Keine relevanten Änderungen [EP-2016]

Richtlinie 2000/53/EG über Altfahrzeuge

Keine relevanten Änderungen [EP-2016]

Richtlinie 2006/66/EG über Batterien und Akkumulatoren sowie Altbatterien und Altakkumulatoren

Keine relevanten Änderungen [EP-2016]

8.2.4 Sekundärrohstoffe

Der Einsatz von Sekundärrohstoffen ermöglicht eine Substitution von Primärrohstoffen, schont primäre Rohstofflager und ist in der Regel mit deutlichen Umweltentlastungen verbunden. Zugleich kann mit dem Einsatz von Sekundärrohstoffen die Abhängigkeit der EU von Rohstoffimporten gesenkt werden. Die EU-Kommission sieht jedoch bei vielen Materialarten den Anteil der Sekundärrohstoffe in der Produktion als deutlich zu gering an und führt dies unter anderem auf Unsicherheiten in Bezug auf die Qualität der Sekundärrohstoffe zurück. Daher sollen EU-einheitliche Qualitätsstandards für bestimmte Sekundärrohstoffe ausgearbeitet werden.

Als eine eigene wichtige Kategorie von Sekundärrohstoffen werden recycelte Nährstoffe hervorgehoben. In den diesbezüglich unterschiedlichen Vorschriften und Qualitätsstandards der Mitgliedsstaaten sieht die EU-Kommission Hemm-

¹⁵ PPK = Papier, Pappe und Karton

nisse, die durch Überarbeitung der EU-Düngemittelverordnung behoben werden sollen.

Eine wachsende Anzahl chemischer Stoffe gilt heute als bedenklich für Umwelt und Gesundheit und ist Beschränkungen oder Verboten unterworfen. Produkte, die vor Erlass der Stoffbeschränkungen in Verkehr gebracht wurden, gelangen jedoch weiterhin in Recyclinganlagen. Um schadstofffreie Materialkreisläufe und eine bessere Rückverfolgung chemischer Stoffe in Produkten zu ermöglichen, sollen dem Aktionsplan der EU-Kommission zufolge das Zusammenspiel der Rechtsvorschriften über Abfälle, Produkte und Chemikalien bewertet und Handlungsoptionen vorgeschlagen werden. Diese Arbeiten werden in die künftige EU-Strategie für eine schadstofffreie Umwelt einfließen [EC-2015a].

8.2.5 Kunststoffe und Kunststoffabfälle

Die Europäische Kommission betrachtet das Recycling von Kunststoffen als einen wesentlichen Baustein einer nachhaltigen Kreislaufwirtschaft. Bislang werden in der EU weniger als 25 % der gesammelten Kunststoffe recycelt, etwa 50 % werden deponiert. Die Kommission verweist darauf, dass die Meeresverschmutzung durch Abfalleinträge zu einem erheblichen Anteil von Kunststoffabfällen verursacht wird. Die Kommission will daher Maßnahmen ergreifen, um Abfalleinträge in die Meere um 30 % zu verringern. Das Auftreten gefährlicher chemischer Zusatzstoffe sowie die Entwicklung innovativer Kunststoffarten werfen weitere Fragen auf [EC-2015a].

Vor diesem Hintergrund wird die Kommission eine Strategie ausarbeiten, um die von Kunststoffen ausgehenden Probleme entlang der gesamten Wertschöpfungskette unter Berücksichtigung ihres gesamten Lebenszyklus einbezieht. Diese Strategie umfasst ein Follow-up zum Grünbuch für Kunststoffabfälle [EU-KOM-2013]. Zur Steigerung des Recyclings sieht der Legislativvorschlag zur Richtlinie 94/62/EG über Verpackungen und Verpackungsabfälle spätestens ab Ende Dezember 2025 eine Recyclingquote von 55 % für Kunststoffe vor. Diese wurde damit gegenüber der bisherigen Zielvorgabe (22,5 %) erheblich gesteigert.

8.2.6 Kritische Rohstoffe

Kritischen Rohstoffen wird von der Europäischen Kommission eine große wirtschaftliche Bedeutung beigemessen. Die Produktgestaltung wird als wesentlicher Ansatzpunkt für die Realisierung eines wirtschaftlich tragfähigen und zugleich hochwertigen Recyclings angesehen. Als weiterer Hinderungspunkt wird ein unzureichender Informationsaustausch zwischen Herstellern und Recyclern gesehen. Die Kommission arbeitet daher an entsprechenden Forschungs- und Innovationsprogrammen und wird bewährte Verfahren fördern [EC-2015a].

8.2.7 Bau- und Abbruchabfälle

Bau- und Abbruchabfälle gehören volumenmäßig zu den größten Abfallverursachern in Europa. Trotz hoher Anteile prinzipiell wiederverwendbarer oder rezyklierbarer Abfälle sind die erzielten Quoten in der EU sehr unterschiedlich. Nach Abfallrahmenrichtlinie sind Bau- und Abbruchabfälle zu mindestens 70 %

zu recyceln oder wiederzuverwenden. Dennoch kommt es zu Wertstoffverlusten durch Mängel bei der Identifizierung, Sammlung und Verwertung. Die Kommission will daher spezielle Leitlinien für Abbrucharbeiten ausarbeiten. Zur Verbreitung bewährter Verfahren sollen fakultative Recyclingprotokolle ausgearbeitet werden, denen die jeweils höchsten Standards zugrunde gelegt werden sollen. Um die Umweltauswirkungen von Gebäuden über den langen Lebenszyklus zu verringern, wird die Kommission Indikatoren zur Bewertung der Umweltleistung über den Lebenszyklus erarbeiten und deren Anwendung fördern [EC-2015a].

8.2.8 Biomasse und biobasierte Produkte

Biobasierte Materialien können einerseits für eine breite Produktpalette genutzt werden. Auf der anderen Seite bieten sie Alternativen zu fossilbasierten Produkten und können ebenso zugleich sowohl stofflich als auch energetisch verwertet werden. Jedoch sieht die EU-Kommission die Gefahr negativer Umweltwirkungen, wenn Beschaffungswege und Landnutzung nicht nachhaltig erfolgen. Die Kommission spricht sich daher für eine Kaskadennutzung der Biomasse mit mehreren Wiederverwendungs- und Recyclingkreisläufen aus. Die Kommission wird bewährte Verfahren in diesem Sektor ermitteln und Innovationen fördern. Zur Förderung des Innovationspotenzials biobasierter Industriezweige fördert die Kommission Investitionen in integrierte Bioraffinerien, die Biomasse und Bioabfälle für unterschiedliche Endverwendungen verarbeiten können [EC-2015a].

8.2.9 Innovation und Investition

Der Übergang zur Kreislaufwirtschaft erfordert den Ausführungen der EU-Kommission zufolge einen Systemwandel, deren Voraussetzungen zunächst zu schaffen sind. Die Umwandlung von Abfällen in Produkte mit hohem Mehrwert erfordert neue Technologien, Prozesse, Dienstleistungen und Geschäftsmodelle, die der Kommission zufolge einer Forschungs- und Innovationsförderung bedürfen. Im Arbeitsprogramm 2016-2017 von Horizon 2020 ist daher die Initiative »Industrie 2020 in der Kreislaufwirtschaft« enthalten, die 650 Millionen € für Demonstrationsprojekte beinhaltet. Weitere bestehende Programme in Horizon 2020 werden Projekte in den Bereichen Abfallvermeidung und bewirtschaftung, Lebensmittelverschwendung, Remanufacturing, nachhaltige Verarbeitungsindustrie, Industriesymbiosen und Biowirtschaft unterstützen. Auch Mittel der Kohäsionspolitik und weiterer europäischer Finanzierungsquellen wie LIFE¹⁶, COSME¹⁷ und der europäische Fonds für strategische Investitionen sollen herangezogen werden [EC-2015a].

8.2.10 Überwachung der Fortschritte

Zur Messung der Fortschritte auf dem Weg zu einer stärker kreislaforientierten Wirtschaft und der Wirksamkeit der Maßnahmen auf EU-Ebene und auf nationaler Ebene beabsichtigt die Kommission in Zusammenarbeit mit der Europäi-

¹⁶ Förderprogramm der EU für Umwelt, Naturschutz und Klimapolitik 2014-2020 (LIFE)

¹⁷ Competitiveness of Enterprises and Small and Medium-sized Enterprises (COSME)

schen Umweltagentur und in Abstimmung mit den Mitgliedstaaten die Einführung eines einfachen und wirksamen Überwachungsrahmens auf der Basis aussagekräftiger Indikatoren. Diese sollen der Kommission zufolge neue Indikatoren für Lebensmittelverschwendung und Indikatoren für Bereiche wie Versorgungssicherheit mit kritischen Rohstoffen, Reparatur und Wiederverwendung, Abfallerzeugung, Abfallbewirtschaftung, Handel mit Sekundärrohstoffen sowie die Verwendung von recycelten Materialien in Produkten umfassen.

8.3 Positionen unterschiedlicher Stakeholder zum Kreislaufwirtschaftspaket

Im Rahmen dieser Studie wurde eine Momentaufnahme (Stand August/September 2016) der Positionen erstellt. Eine Auswahl von Positionen findet sich in Anhang 10.1 zu dieser Studie.

9 Strategische Diskussion zu einer Circular Economy

9.1 Zur Notwendigkeit einer Circular Economy

Ist eine Circular Economy alternativlos? Für die Beantwortung dieser Frage macht es zunächst Sinn, eine **langfristige Perspektive einzunehmen**. Demgemäß ließen sich drei idealtypische Optionen in der Rohstoffnutzung unterscheiden:

- Ein uneingeschränkter und aufzehrender Verbrauch von Rohstoffen (I)
- Eine ausschließliche Nutzung von erneuerbaren Rohstoffen (II) und
- Ein vollständig geschlossener anthropogener Stoffkreislauf (III)

Der uneingeschränkte, aufzehrende Verbrauch sämtlicher zur Verfügung stehender Ressourcen und Reserven (I) wäre dann denkbar, wenn die verfügbaren Rohstoffmengen so groß wären, dass sie relevante menschliche Zeiträume¹⁸ auf jeden Fall abdecken. Die absolute Reichweite von Reserven und Ressourcen wird heute für die meisten Rohstoffe auf bis zu 1 000 Jahren geschätzt [BGR-2006]. Beschränkt man die Betrachtung auf die erschließbaren Reserven, sind es immer noch einhundert bis mehrere hundert Jahre [BGR-2016], [UNEP-2016]. Im Vergleich zu den 200 000 Jahren Präsenz des modernen Menschen (*Homo sapiens*) auf der Erde ein eher kurzer Zeitraum. Ein uneingeschränkter Verbrauch wird verschiedentlich auch weltanschaulich begründet¹⁹.

Die Nutzung von erneuerbaren Rohstoffen (II) ist eine wichtige Zukunftsoption, besitzt allerdings zwei wesentliche Grenzen. Erstens sind viele wichtige Rohstoffe vor allem für moderne elektronische, optische Produkte sowie Baustoffe vor allem metallischer oder mineralischer Natur und damit nicht nachwachsend. Zweitens besteht bei der Nutzung erneuerbarer Rohstoffe bereits heute eine Konkurrenz zwischen Nahrungsmitteln, Energierohstoffen und stofflichen Anwendungen um die landwirtschaftlichen Nutzflächen. Gleichzeitig zieht ein Wechsel oder eine Intensivierung der Flächennutzung nicht selten auch negative ökologische Folgen nach sich (insbesondere Verlust an Biodiversität). Nichtsdestotrotz darf für die Zukunft aufgrund biotechnologischer Fortschritte mit einer Zunahme der Menge an erneuerbarer Rohstoffen gerechnet werden.

Die Machbarkeit dieser beiden Optionen hängt im hohen Maße von der Menge verfügbarer Rohstoffe einerseits und der Zahl der Menschen und ihren spezifischen Konsumniveaus andererseits ab. Ein vollständig geschlossener anthropogener Stoffkreislauf (III) könnte hingegen dazu beitragen, diese Abhängigkeit zu überwinden, indem die Kreislaufzeiten der Stoffe an die Bedarfe angepasst werden. Bis heute ist aber für kein Material die vollständige Kreislaufführung

¹⁸ Die Festlegung des »menschlichen Zeitraums« ist eine wichtige Referenzgröße. Sie kann durchaus begründet von einer menschlichen Lebensspanne (80 Jahre), über die durchschnittliche Präsenzzeit einer Art auf der Erde (ca. 2 Millionen Jahre) bis hin zum Ende höheren organischen Lebens auf der Erde (ca. 900 Millionen Jahre) variieren.

¹⁹ Beispiele sind die Verneinung einer langfristigen menschlichen Existenz auf der Erde (»No Future« (Punk-Bewegung), Erwartung des »Jüngsten Gerichts« (diverse religiöse Gruppen) etc.) oder eine Verlagerung des Problems im Vertrauen auf einen beständigen technischen Fortschritt in die Zukunft (Transhumanismus, Weltraumkolonisierung).

gelingen. Selbst bei gut rezyklierbaren Stoffen wie Glas oder Stahl liegen die Recyclingquoten noch deutlich unter 100 %. Gründe dafür sind dissipative Verluste und die Anreicherung von Schadstoffen oder von Stoffen, die das Recycling stören.

Aus dieser idealtypischen Betrachtung lässt sich Folgendes schließen: Je länger Menschen Stoffe verbrauchen wollen, je höher ihre Zahl und ihr spezifisches Konsumniveau sein wird und je mehr stoffbedingte Funktionalitäten von den Produkten gefordert werden, desto wichtiger wird die Kreislaufführung von Stoffen. Aus dieser langfristigen Perspektive steigert also die Kreislaufführung und damit das Konzept der Circular Economy die Robustheit des sich wechselseitig bedingenden Systems von Produktion und Konsum.

In der **kurzfristigen Perspektive** stellt sich die Frage, ob der Übergang von der heutigen weitgehend linearen Durchflusswirtschaft zu einer Circular Economy im Gegensatz zur voranstehenden Analyse auch systemische Instabilitäten erzeugen kann. Diese können vor allem in Bezug auf die kurz- bis mittelfristige Wettbewerbsfähigkeit der Industrie gegeben sein. Würde die Kreislaufführung von Stoffen Beschränkungen in der stofflichen Vielfalt von Produkten bewirken oder die Kosten für den Rohstoffeinsatz erheblich steigern, so wären vor allem rohstoffnahe und materialintensive Industrien nachteilig betroffen. Gleichzeitig dürfte die Zirkularität von Produkten nicht auf Kosten anderer wichtiger Kriterien der Produktperformance gesteigert werden. Zur Produktperformance zählen insbesondere auch ökologische Kriterien, wie beispielsweise die Treibhausgasemissionen während der Nutzungsphase energierelevanter Produkte. Werden diese Effekte nicht beachtet, könnte die Umsetzung einer Circular Economy entgegen ihrer Intention gerade dazu führen, dass Marktanteile sowohl innerhalb einer Circular Economy als auch außerhalb an nicht-zirkuläre materielle Güter verloren gehen.

Wenn die Circular Economy als langfristiges Ziel wünschenswert ist, so muss daher der Pfad zu ihrer Umsetzung über wettbewerbsfähige Zwischenschritte erfolgen, wenn man eben dieses Ziel nicht gefährden will. Hierin liegt die besondere Herausforderung bei ihrer Umsetzung.

9.2 Die Argumente für eine Circular Economy

Im Folgenden werden die wichtigsten Argumente, die für eine Circular Economy vorgebracht werden, kurz diskutiert.

Wertschöpfung durch Recycling als Argument

Der Kreislaufführung von Waren und Materialien wird ein hohes Wertschöpfungspotenzial oder alternativ Einsparpotenzial zugesprochen. Diese Sichtweise geht davon aus, dass durch Deponierung, energetische Verwertung oder dissipative Verluste geschaffene Materialwerte verloren gehen. In Anbetracht der heute sehr niedrigen Recyclingraten ist dies einerseits richtig, andererseits muss der Aufwand für das Recycling und das erreichbare Qualitätsniveau bei den Sekundärrohstoffen im Vergleich zu Primärrohstoffen berücksichtigt werden.

Arbeitsplatzeffekte als Argument

Im Zusammenhang mit der Circular Economy werden häufig positive Arbeitsplatzeffekte im Zusammenhang mit der Kreislaufführung von Stoffen prognostiziert. Diese können im Bereich der Sammlung und Aufbereitung von Stoffströmen sowie der Wartung und Reparatur von Produkten entstehen. Grobe Abschätzungen, die auf Basis erwartbarer Raten für die Zirkularität beruhen und diese in ein Verhältnis zum heutigen Status der Kreislaufwirtschaft setzen, sind allerdings kaum belastbar, da sie die Durchsetzbarkeit zirkulärer Produkte am Markt zumeist nicht angemessen diskutieren und berücksichtigen. Gleichzeitig fehlen belastbare Argumentationen dazu, wo diese Arbeitsplätze entstehen.

Ressourcenverknappung als Argument

Die Kreislaufführung von Stoffen macht dann Sinn, wenn Ressourcen nicht erneuerbar (nachwachsend) sind, in menschlichen Zeiträumen knapp werden und aus der Umwelt auch unter Berücksichtigung erwartbarer technischer Fortschritte nicht mit vertretbarem Aufwand zurückgewonnen werden können. Die meisten Rohstoffe werden aus heutiger Perspektive in den nächsten Jahrzehnten bis Jahrtausenden knapp werden, ob dies bereits heute ein Umschwenken auf eine Circular Economy erfordert, hängt vor allem auch davon ab, welche Anpassungsgeschwindigkeit vom linearen zum zirkulären System für realistisch gehalten wird.

Verminderung von Flächenkonkurrenzen als Argument

Eine Circular Economy, die die Ressourcenentnahme aus der Umwelt reduzieren will, muss den Energiebedarf für ihren Betrieb vorzugsweise aus nachwachsenden Rohstoffen decken. Der umfassende Ersatz fossiler Rohstoffe durch nachwachsende Rohstoffe (Biomasse) führt zu Flächenkonkurrenzen bei der landwirtschaftlichen Produktion von Nahrungsmitteln, Energiepflanzen und stofflicher Nutzung. Die weltweiten Flächen reichen für eine vollständige Befriedigung der verschiedenen Ansprüche auf heutigem oder gar zukünftigem Konsumniveau nicht aus. Gleichzeitig kann eine verstärkte Flächennutzung sich auch sehr nachteilig auf Naturschutz und Biodiversität auswirken. Recycling und Kaskadennutzung von biobasierten Rohstoffen könnten hier zwar entlastend wirken, aber erst dann wenn sie ein ausreichend hohes Niveau der Zirkularität erreicht haben.

Emissionsminderung als Argument

Adressiert eine Circular Economy auch die Verringerung von Materialverlusten, indem sie Leckagen schließt, so wird durch sie die Anreicherung persistenter, human- und ökotoxikologisch bedenklicher Stoffe in der Umwelt begrenzt. Gleichzeitig kann dies aber auch zum entgegengesetzten Effekt einer Anreicherung innerhalb der anthropogenen Stoffkreisläufe führen. Ob Verdünnung oder Abbau in der Umwelt oder die Abtrennung und Entfernung aus den Stoffkreisläufen die bessere Option ist, muss stoff- und anwendungsspezifisch entschieden werden.

Effizienzgewinne als Argument

Eine Circular Economy kann aber auch aus Effizienzgesichtspunkten Sinn machen, wenn sie dafür sorgt, dass Materialien und Produkte so gestaltet werden, dass die Sekundärrohstoffe aus den Abfallströmen mit geringerem Energieaufwand zurückgewonnen werden können als Primärrohstoffe aus natürlichen Lagerstätten. Gelingt dies hingegen nicht, könnte eine Circular Economy anderen Nachhaltigkeitszielen wie der Rohstoffproduktivität oder der Minderung von Treibhausgasen entgegenwirken.

Versorgungssicherheit als Argument

Neben der natürlichen Verknappung können auch geopolitische und marktseitige Versorgungsrisiken als Argumente für eine Ausweitung der Kreislaufführung von Stoffen dienen, da durch den Aufbau anthropogener Feedstocks die Abhängigkeit von kritischen Lagerstätten reduziert werden kann. Gleichzeitig kann man allerdings davon ausgehen, dass in einer globalisierten Wirtschaft solche Risiken immer existieren, unabhängig davon, ob sie Primärlagerstätten oder anthropogene Lagerstätten betreffen.

Minderung struktureller Risiken als Argument

Es existieren Stoffe, bei denen die Reichweite der Reserven sehr hoch und die Versorgungssicherheit aus heutiger Perspektive unkritisch ist, dennoch kann in diesem Falle die Kreislaufführung Sinn machen, wenn diese Stoffe nur schwer oder gar nicht substituierbar sind. Die Circular Economy würde so auch Risiken zum Beispiel durch eine zukünftige Ausweitung der Anwendung des Stoffs verringern. Gerade solche optionalen und vagen Risiken lassen sich allerdings nur schwer quantifizieren, weshalb hieraus kaum echte Triebkräfte für eine Circular Economy erwartet werden können.

9.3 Ein systemischer Blick auf die Circular Economy und grundsätzliche Zielkonflikte

Ziel der Circular Economy ist es, die absolute Rohstoffentnahme aus der Umwelt zu reduzieren, um einerseits die Quellen zu schonen und andererseits das aus dem Bevölkerungswachstum resultierende Konsum- und Wohlstandswachstum dauerhaft befriedigen zu können. Nur daraus kann das im Rahmen der Umweltdiskussionen entstandene Konzept seine Berechtigung ziehen. Damit ist aber zunächst keine absolute Reduktion des Rohstoffinputs in die stoffverarbeitenden Industrien, eine Drosselung der Produktion oder ein Verzicht auf Wachstums adressiert, sondern diese sollen statt aus der Rohstoffentnahme aus einer Steigerung der Zirkularität gespeist werden. Dabei kommt der Transformation des Energiesystems (u. a. Reduzierung/Verzicht kohlenstoffhaltiger Energieträger, Substitution durch erneuerbare Energien, Steigerung der Energieeffizienz) eine sehr große Bedeutung zu, da ca. 45 % aller verbrauchten Materialien für energetische Zwecke genutzt sind (vgl. Kap. 9.4).

Große Mengen der gesamten Rohstoffentnahme dienen der Energieerzeugung. Fossile Rohstoffe sind aufgrund ihrer langen Regenerationszeiten im Sinne einer Circular Economy nicht kreislauffähig. Regenerative Rohstoffe für die Erzeugung von Lebensmitteln, Energie und Werkstoffen können hingegen als »rezyklierbar« innerhalb eines biologischen Kreislaufs angesehen werden,

wenn sie *nachhaltig* angebaut werden. Die Verwendung von regenerativen Rohstoffen für die Energieerzeugung ist daher ein wichtiger Bestandteil der Circular Economy. Der fossile oder nicht nachhaltige Anteil des notwendigen Energieeinsatzes zur Aufrechterhaltung einer Circular Economy darf die Einsparungen durch eine Kreislaufführung nicht übersteigen.

Dort, wo die Circular Economy in Bezug auf eine Minderung der Rohstoffentnahme an ihre Grenzen gelangt, muss sie durch Effizienzmaßnahmen ergänzt werden. Deren Potenzial ist aber aufgrund von absoluten Optimierungsgrenzen und Reboundeffekten begrenzt [VCI-2016], [Frondele-2012], [Madlener-2011]. Gelangen Circular Economy und Effizienzstrategien in Bezug auf eine Verringerung der Rohstoffentnahme an ein Ende, kann nur noch durch Suffizienz eine weitere Verringerung der Ressourcenentnahme gelingen [Paech-2012]. Da Suffizienzstrategien heute weder milieuübergreifend noch global anschlussfähig sind und Effizienzstrategien nur geringe Steigerungspotenziale aufweisen, kommt der Circular Economy eine besondere wirtschaftspolitische Bedeutung zu.

Aus systemischer Perspektive ist festzuhalten, dass eine Circular Economy in Bezug auf die stoffliche Nutzung zunächst die prinzipielle Kreislauffähigkeit von Materialien und Waren durch eine ökologische Produktgestaltung voraussetzt. Diese Kreislauffähigkeit kann ihre Ausprägung in Merkmalen wie Reparierbarkeit, Aufrüstbarkeit oder Rezyklierbarkeit finden und bestimmt, wie effizient und umfassend eine Circular Economy überhaupt realisiert werden kann. Für eine effiziente Kreislaufführung ist es häufig sinnvoll, den Grad der Desintegration von Waren und Materialien am EoL so gering wie möglich zu halten. Die Rückführung sollte daher sowohl auf den Ebenen der Produkte (Aufarbeitung, Reparatur), weternutzbaren Komponenten oder Werkstoffen (werkstoffliches Recycling) und auch der Rohstoffe (rohstoffliches Recycling, Feedstockrecycling) stattfinden. Eine gute Zugänglichkeit und Zerlegbarkeit von Produkten sowie die Vermeidung von Stoffen, die die Kreislauffähigkeit einschränken oder solchen, die durch die Kreislaufführung ihre Funktionalität einbüßen, sind diesbezüglich wichtige Gestaltungskriterien.

Eine kreislaufgerechte Material- und Produktgestaltung wird nicht selten mit Aspekten der Produktperformance, -sicherheit oder Energieeffizienz in der Nutzungsphase in Konflikt geraten. Ein Beispiel dafür sind kraftstoffsparende CFK-Komponenten, wie sie im Automobilbereich zunehmend relevant werden und die deutlich schlechter rezyklierbar sind als funktionsgleiche, aber schwerere Metalle. Solche Zielkonflikte müssen frühzeitig erkannt und Priorisierungen vereinbart oder mögliche Innovationen stimuliert werden.

Gelingt es nicht, die EoL-Mengen als Sekundärstoffströme zum ursprünglichen Verwendungszweck zurückzuführen, ist eine echte Circular Economy nur sehr begrenzt realisierbar. Kaskadennutzungen können sicherlich einen wichtigen Beitrag für eine Circular Economy leisten, im Einzelnen muss aber hinterfragt werden, wie hoch ihr stoffliches Substitutionspotenzial ist. Dies gilt unabhängig davon, ob die Weiterverwendung als Down- oder Upcycling bezeichnet wird. So wurden für viele Rezyklate spezielle Sekundäranwendungen erst entwickelt und neue Märkte geschaffen, so dass kein Beitrag zur Reduzierung der Rohstoffentnahme entstand. Die energetische Verwertung am EoL ist zur Redukti-

on des rohstofflichen Inputs für die Energieerzeugung dann eine sinnvolle Option, wenn der Aufwand für das Recycling höher ist als für die Neuproduktion²⁰. Grundsätzlich gilt, dass die Kosten für qualitativ gleichwertige Sekundärrohstoffe die Kosten für Primärrohstoffe nicht übersteigen dürfen.

Begrenzend auf die erreichbare Zirkularität in einer Circular Economy wirken sich auch Import und Export aus. Im Fall eines Exportüberschusses gehen dem Betrachtungsraum Rohstoffe verloren. Im Falle eines Importüberschusses könnten bei hohen Graden der Zirkularität Materialüberschüsse entstehen, die nicht mehr sinnvoll verwertet werden können. Letztlich führt dies dazu, dass anthropogene Lagerstätten abseits der Orte des rohstofflichen Bedarfs entstehen, was der heutigen Situation bei Primärlagerstätten entspricht. Weiterhin können durch Importe Waren oder Materialien in die Circular Economy gelangen, die den Ansprüchen von Kreislauffähigkeit nicht genügen.

Eine große logistische Herausforderung bei der Umsetzung der Circular Economy sind die langen Nutzungszeiträume von Waren, die sich in großen anthropogenen Lagern manifestieren. Einerseits ist die lange Nutzungsdauer ein wichtiges Produktmerkmal, um die Rohstoffentnahme zu reduzieren. Andererseits führt sie dazu, dass die Materialien vor allem bei wachsenden Märkten nicht zu dem Zeitpunkt zur Verfügung stehen, zu dem sie benötigt werden, um einen hohen Rezyklatanteil in der Neuproduktion zu gewährleisten. Im entgegengesetzten Fall kann es passieren, dass eine Ware oder ein Material zu dem Zeitpunkt, an dem die EoL-Mengen anfallen, aufgrund von Marktentwicklungen weniger oder gar nicht mehr produziert wird und damit die Senke für die Sekundärrohstoffströme fehlt. Darüber hinaus kann auch die Qualität der Materialien, die in den anthropogenen Lagern gespeichert sind, zum Zeitpunkt ihrer Verwertung aufgrund von neuen Schadstoffgrenzwerten, Verboten, funktionellen Erfordernissen oder abnehmender Verbraucherakzeptanz nicht mehr den jeweils aktuellen Anforderungen genügen.

Eine Circular Economy wird sich nicht verlustfrei realisieren lassen. Vielen Anwendungen sind dissipative Verluste immanent. Abrieb und Verwitterung, aber auch sogenannte »umweltoffene« Anwendungen und das Littering von Abfällen gehören dazu. Nur in wenigen Fällen werden sich solche weit verteilten Mengen unter ökologisch und ökonomisch vertretbarem Aufwand zurückgewinnen lassen. In allen anderen Fällen ist eine möglichst schnelle Abbaubarkeit sinnvoll.

Die verschiedentlich für die Circular Economy vorgeschlagene strikte Trennung in einen biologischen und technischen Kreislauf ist nicht sinnvoll. Denn es macht durchaus Sinn, dass fossile Werkstoffe, deren dissipative Verluste aus dem technischen Kreislauf sich nicht vermeiden lassen, biologisch abbaubar sind. Gleichzeitig ist es ebenfalls wünschenswert, dass biobasierte Materialien, die rezyklierbar sind, möglichst dauerhaft im technischen Kreislauf verbleiben, auch wenn sie prinzipiell bioabbaubar wären. Weiterhin ist die energetische Verwertung im Vergleich zur Kompostierung oft die ökologischere Variante:

²⁰ Im Detail muss hier berücksichtigt werden, ob der rohstoffliche Input fossil oder erneuerbar ist und wie die energetische Verwertung einer Neuproduktion gutzuschreiben ist.

Nur in Einzelfällen wird das Nährstoffangebot aus der Kompostierung ökologisch relevanter sein als der Energiegewinn.

Im Resultat lassen sich sieben Punkte als zentrale Herausforderungen für die Umsetzung einer zirkulären Ökonomie zusammenfassen:

Zentrale Herausforderungen für die Transformation zu einer Circular Economy

- 1) Eine Schlüsselrolle für die Umsetzung einer Circular Economy spielt die Entwicklung von kreislauffähigen Produkten. Ihre Durchsetzung erfordert es, dass sie gegenüber nicht kreislauffähigen Produkten wettbewerbsfähig sind. Die Wettbewerbsfähigkeit muss dabei insbesondere auch die Effizienz und Performance der Produkte bei Herstellung und Nutzung in den Blick nehmen.
- 2) Der zirkuläre Anteil in der Warenproduktion (recycled content) in Form von reparierten oder überholten Produkten, wiederverwerteten Komponenten und rezyklierten Werk- und Rohstoffen muss gesteigert werden.
- 3) Sortier-, Trenn- und Aufbereitungstechnologien inklusive Systemen zur lebenszyklusweiten Logistik und Materialidentifikation müssen weiterentwickelt werden. Dabei spielt eine enge Abstimmung mit der Entwicklung kreislauffähiger Produkte eine wichtige Rolle.
- 4) Der teilweise sehr große zeitliche Unterschied zwischen Rohstoffbedarf und Verfügbarkeit der Sekundärrohstoffe und die damit verbundenen Mengen-, Qualitäts- und Akzeptanzprobleme erfordern neue Methoden zur Prognose und langfristigen Rohstoffstrategie.
- 5) Die Materialverluste bei dissipativen und umweltoffenen Anwendungen²¹ müssen vermindert werden. Materialien, deren Verluste unvermeidbar sind oder deren Verlust intendiert ist, sollten eine ausreichend schnelle Abbaubarkeit besitzen.
- 6) Rohstoffbedarfe, die durch eine Kreislaufführung nicht gedeckt werden können oder die zur Deckung des Energiebedarfs einer Circular Economy erforderlich sind, müssen zunehmend aus regenerativen Quellen nachhaltig gewonnen werden (Flächenkonkurrenzen zur Nahrungsmittelproduktion müssen berücksichtigt werden).
- 7) Eine Circular Economy und ihre Ausgestaltung dürfen anderen wichtigen gesellschaftlichen Zielen wie der Bewältigung des Klimawandels, der Energiewende oder der Verringerung von Armut nicht entgegenwirken.

9.4 Status bei der Transformation zu einer Circular Economy

Bild 9-1 und Bild 9-2 zeigen die gemäß der Materialflussanalyse aus Bild 4-2 berechneten weltweiten bzw. europäischen Materialflüsse im Jahr 2005²². In diesem Jahr wurden weltweit insgesamt ca. 62 Milliarden Tonnen an Materialien verarbeitet. Diese Summe setzt sich zusammen aus der primären Rohstoffentnahme aus der Umwelt (58 Milliarden Tonnen) und den durch Recycling im Wirtschaftskreislauf geführten Materialien (4 Milliarden Tonnen). 28 Milliarden Tonnen (etwa 45 %) aller verarbeiteten Materialien werden weltweit für energetische Zwecke (Energiegewinnung, Nahrung, Futter) genutzt, 30 Milliarden Tonnen (ca. 48 %) für die stoffliche Nutzung²³. 26 Milliarden Tonnen (87 %) erhöhen davon den materiellen Lagerbestand und 4 Milli-

²¹ Dies sind z. B. Materialien, die in der Umwelt verbleiben sollen, wie Pflanztpöfe, Mulchfolien oder Bodengitter.

²² Literaturstudien zeigen, dass sich an den sich ergebenden Materialflussanteilen bis heute nichts Wesentliches geändert hat.

²³ Ca. 7 % machen die sogenannte »nicht verwertete Entnahme, d. h. Abraum, Steine, Baggergut etc. aus → diese Stoffe verbleiben in der Regel nicht weiterverarbeitet in der Umwelt (Halden, Schlammseen etc.)

arden Tonnen (13 %) werden zu kurzlebigen Produkten verarbeitet. Diese Zahlen zeigen die überragende Bedeutung, die eine Transformation des Energiesystems für die Zirkularität einer Volkswirtschaft hat. Der zunehmende Verzicht auf fossile Energieträger im Energiesystem verbunden mit dem gesteigerten Einsatz von erneuerbaren Energien (z. B. nach dem Vorbild der deutschen Energiewende) sowie einer erhöhten Energieeffizienz würde daher die Zirkularität auch ohne stoffliches Recycling deutlich steigern helfen.

Etwa 21 % des insgesamt verarbeiteten Materials werden pro Jahr zu EoL-Abfall und können prinzipiell rezykliert werden. Allerdings geschieht dies weltweit nur mit ca. 31 % und in der EU (2005) mit knapp 42 % des EoL-Abfalls.

Bild 9-1:
Materialflüsse und
Zirkularität in der Welt
(2005) gemäß Modell
aus Bild 4-2 – alle
Werte in Milliarden
Tonnen, nach [Haas-
2015]

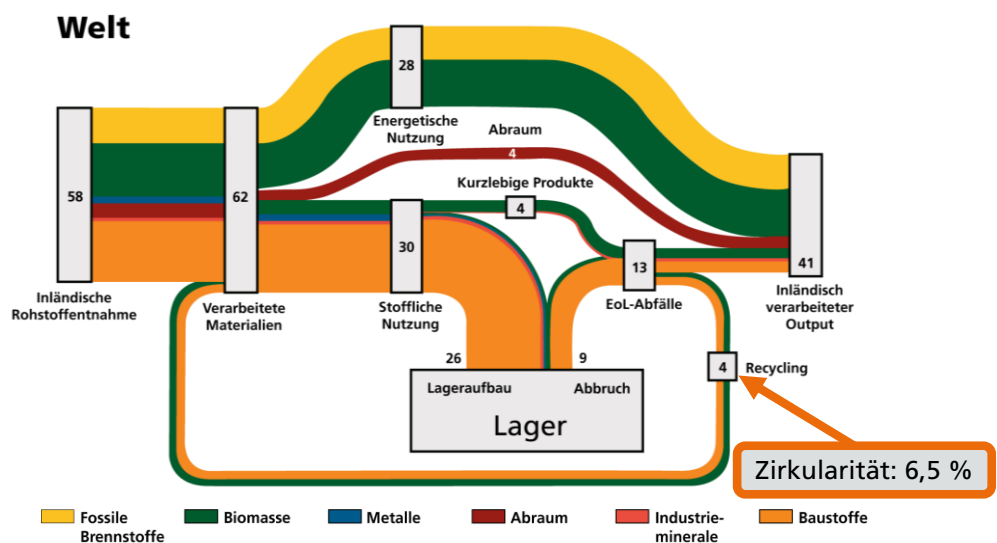
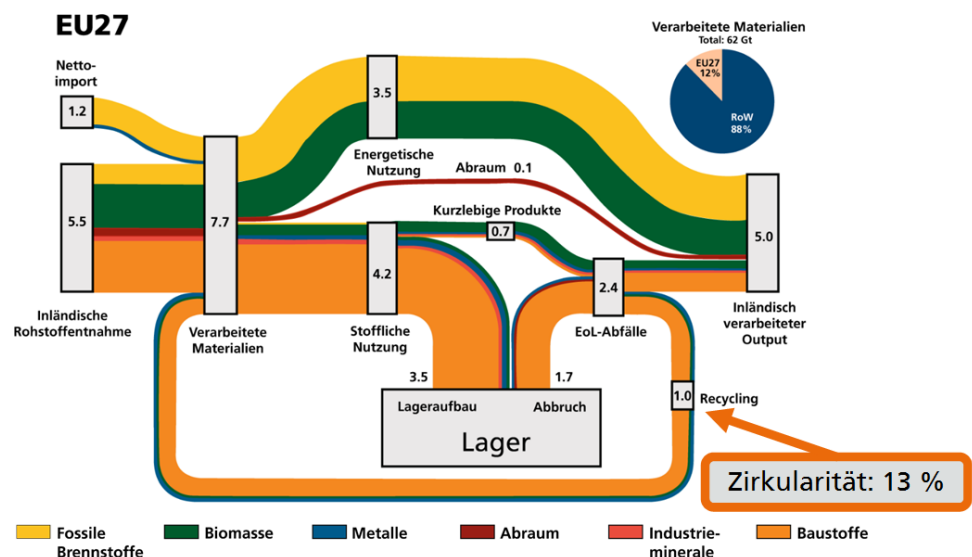


Bild 9-2:
Materialflüsse und
Zirkularität in der EU
(2005) gemäß Modell
aus Bild 4-2 – alle
Werte in Milliarden
Tonnen, nach [Haas-
2015]



Bezogen auf die gesamte eingesetzte Materialmenge von 62 Milliarden Tonnen beträgt der Recyclinganteil weltweit ca. 6,5 % und in der EU-27 13 % (vgl. Bild 9-1 und Bild 9-2) [Haas-2015]. Dies ist zugleich das Maß der *Zirkularität* der

weltweiten Wirtschaft bzw. der EU²⁴. Die Zirkularität in Deutschland beträgt nach diesem Modell im Jahr 2014 überschlagsmäßig 17 %, bezieht man die nicht verwertete inländische Entnahme mit ein nur 7,6 % (Daten²⁵ aus [DESTA-TIS-2016]). Würde man die energetische Materialnutzung aus der Bilanz ausschließen, käme man für die EU immerhin auf 40 – 45 % Zirkularität, nach zusätzlicher Subtraktion der Biomasse bereits auf 60 – 70 %.

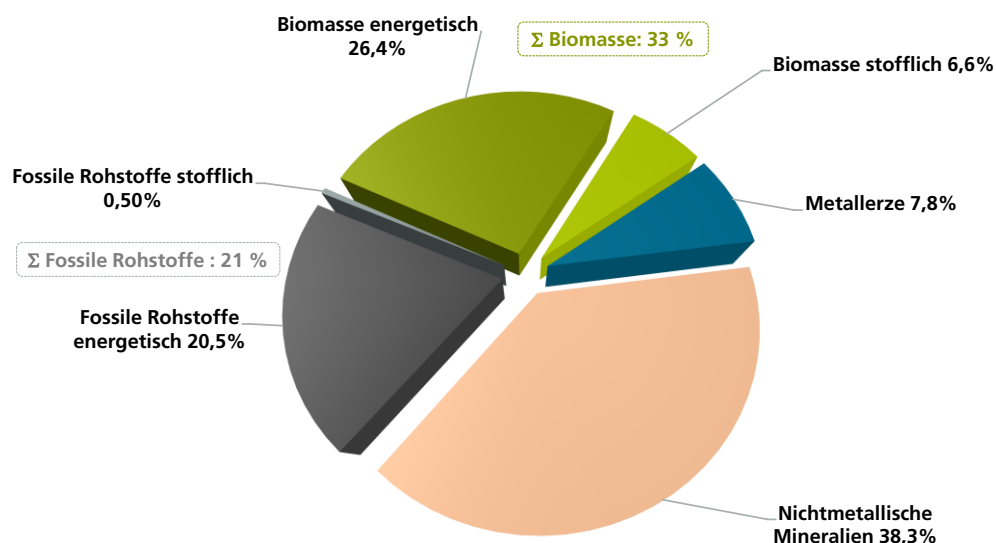
Dieses Ergebnis muss ernüchternd auf alle wirken, die von einer raschen Realisierung einer einfach zu erzählenden Circular-Economy-Geschichte durch idealtypische Kreisläufe ausgehen. Selbst die Anhebung der Recyclingquote auf 65 % bezogen auf den EoL-Abfall (bestehend aus einem Mix kurz- und langlebiger Produkte) und ihre EU-weite Umsetzung (eine solche Recyclingquote wird von kaum einem EU-Land aktuell erreicht [IW-2016], (vgl. Bild 9-6) könnte die Zirkularität dieses Wirtschaftsraums insgesamt immerhin auf 20 – 25 % steigern.

Die Transformation von einer linearen Durchflusswirtschaft zu einer Circular Economy kann daher nur in einem längeren Zeitraum erfolgen und über definierte Beiträge und Zwischenziele erfolgen, da der Abstand zum Ziel noch sehr groß ist. Eine Circular Economy, deren Zirkularitätsziele keine oder zu geringe wirtschaftlichen Vorteile versprechen, wird sich kurzfristig nicht von selbst entwickeln. Daher wird sich die Transformation nur vollziehen, wenn sie durch politisch-strategische Initiativen angeregt und mit gesellschaftlich gewollten Zielen unterlegt wird. Dabei müssen Lösungen im Vordergrund stehen, die wirtschaftlich auf Dauer tragfähig sind. Sowohl Deutschland als auch die EU befinden sich auf diesem strategischen Weg, Transformationsbeiträge regulatorisch und technologisch zu verstetigen und zur Grundlage ihrer nationalen und europäischen Politik zu machen. Was bedeutet das für die relevanten Rohstoffarten, deren Verteilung an der weltweiten Rohstoffentnahme in Bild 9-3 dargestellt ist?

²⁴ Hier muss allerdings beachtet werden, dass die EU ein großer Nettoimporteur von Rohstoffen ist, so dass die Umweltwirkungen dieser importierten Rohstoffentnahmen im europäischen Bilanzkreis nicht in Erscheinung treten.

²⁵ 1 685 Millionen Tonnen Rohstoffe (inländische Entnahme + Importe), 2 020 Millionen Tonnen nicht verwertete Entnahme, 401 Millionen Tonnen EoL-Abfall, 69 % Recyclingquote (Durchschnitt über alle Abfälle)

Bild 9-3:
Anteil Rohstoffarten an
der weltweiten Roh-
stoffentnahme von 58
Milliarden Tonnen in
2005, nach [Haas-
2015]



Fossile Rohstoffe

Weltweit wurden 2005 von den 12 Milliarden Tonnen fossiler Rohstoffe 98 % zur Energiebereitstellung durch Verbrennung genutzt – und waren damit für eine Circular Economy verloren. Der Ersatz fossiler Energieträger durch erneuerbare Energiebereitstellung durch Wind, Sonne, Geothermie und Gezeitenkraft kann die Zirkularität steigern, weil nahezu keine fossilen Energieträger zugeführt werden müssen. Die Nutzung von CO₂ als Rohstoff für die chemische Produktion (Carbon Capture and Use - CCU) könnte eine zukünftige Möglichkeit sein, die Zirkularität fossiler Energieträger zu erhöhen, allerdings nur, wenn die energieintensive Aktivierung des CO₂ mit regenerativer Energie über einen ökonomisch und ökologisch tragfähigen Weg gelingt²⁶. Für die verbleibenden 2 % fossile Rohstoffe, die z. B. für Kunststoffe oder Schmierstoffe stofflich genutzt werden, stellt Recycling eine Option dar.

Biomasse

Von den 19 Milliarden Tonnen Biomasse im Jahr 2005 wurden ca. 80 % energetisch genutzt: für Ernährung, Futter, Treibstoffe und als Energieträger. Wenn Biomasse nachhaltig angebaut wird, kann zumindest der CO₂-Kreislauf nahezu geschlossen werden. Ca. 20 % der Biomasse werden stofflich genutzt, wobei Holz als Baumaterial sowie zur Papierherstellung den größten Anteil ausmacht. Recyclingketten sind für diese Bereiche lange etabliert und arbeiten effizient, für Biokunststoffe sind sie hingegen noch nicht etabliert. Auch sonstige Rest- und Abfallbiomasse (meist zu Energie) sowie Stoffwechselprodukte (zur Düngung) können zu einem gewissen Grad verwertet werden. Im Nahrungsmittelsektor würde die Vermeidung von Nahrungsmittelabfällen sowie die Reduzierung des stoff- und energieintensiven²⁷ Fleischkonsums die Zirkularität steigern,

²⁶ Wenn CO₂ als industrieller Reststoff bzw. als »entstehender Rohstoff« im Produktionssystem genutzt werden soll, ist es notwendig, eine entsprechende CO₂-Logistik (Abscheidung, Sammlung, Aufarbeitung, Lagerung, Transport) zusätzlich aufzubauen und/oder chemische Produktionen an den Ort des CO₂-Anfalls zu verlagern.

²⁷ u. a. Auswirkungen durch Flächenverbrauch für Futtermittel, direkte (Anbau Futtermittel, Herstellung Mineraldünger, Tierhaltung, Logistik) und indirekte (Landnutzungsänderung) Treibhausgasemissionen, Fleischverluste in Produktion und Handel, Wasserverbrauch, Emissionen durch Überdüngung und Ausbringung von Gülle und Gärresten

wenn für deren Ersatz nachhaltig produzierte und ökobilanziell besser abschneidende pflanzliche Lebensmittel zum Einsatz kommen [BUND-2014], [Schmidinger-2012], [WWF-2012].

Metalle

Entnommene Metallerze beliefen sich 2005 auf eine Masse von 4,5 Milliarden Tonnen. Ihr durchschnittlicher Metallgehalt betrug knapp 18 %. Gewaltige Abraumberge und Schlämme aus Laugungsprozessen sind Begleiter bei der Primärgewinnung. Metalle gelangen zum größten Teil in die Bestandszufuhr und stehen aufgrund der langen Lebensdauer metallischer Bauteile meist erst nach Jahrzehnten für ein Recycling zur Verfügung. Massenmetalle wie Eisen, Aluminium, Kupfer und Blei erreichen Recyclinganteile von 45 % bis hin zu 90 %. Auf der anderen Seite befinden sich die sogenannten Technologiemetalle mit Recyclingraten deutlich kleiner als 1 % und Recyclinganteilen nahe 0 % [BMW-2015]. Sie werden nur in sehr kleinen Anteilen in Bauteilen benötigt, sind Bestandteile komplexer Legierungen und Verbundmaterialien und in technischen Produkten mit einer Vielzahl unterschiedlicher Elemente vertreten. Die Folge ist, dass die Separierung der Technologiemetalle – wenn überhaupt möglich – sehr teuer ist. Wegen volatiler Rohstoffpreise sowie ausreichender Verfügbarkeit wird derzeit kaum in Pilotanlagen zum Recycling investiert. Dieser Sachverhalt trifft auch auf den Stoffstrom der LCD-Computerbildschirme (vgl. Kapitel 7) zu. Hinzu kommt, dass etablierte Recyclingtechnologien (Schredder, Mühlen, magnetische oder optische Sortierungen) eher grobschlächtig und weit weniger entwickelt sind als die vorgelagerten Produktionstechnologien.

Nichtmetallische Mineralien

Nichtmetallische Mineralien machen mit 22 Milliarden Tonnen den größten Anteil an der weltweiten Rohstoffentnahme aus, ihr Verbrauch wächst immens. Baumineralien wie Sand, Kies und Industriemineralien wie Ton, Feldspat, Gips, Quarz oder Kaolinit haben den größten Anteil daran. Auch Mineralien werden vor allem für langlebige Güter eingesetzt und vermehren vor allem den Materialbestand. Sie können zu hohen Prozentsätzen recycelt werden, dabei handelt es sich aber meist um ein Downcycling (Ausnahme: Glas). Um Gebäude und Infrastrukturen recyclingfreundlicher zu machen, müssen sie vor allem recyclinggerecht designet und ein regionales Stoffstrommanagement muss etabliert werden, damit Transportwege aus ökonomischen und ökologischen Gründen klein bleiben.

Fazit

Nur ein kleiner Teil des *insgesamt* verarbeiteten Materials wird aktuell im Kreis geführt. Recycling bezieht sich in der Regel auf den im Verhältnis zu allen verarbeiteten Materialien eher kleinen Stoffstrom des EoL-Abfalls. Weder die Welt noch die EU noch Deutschland befinden sich in Sichtweite einer realisierten Cir-

(v. a. Nitrat, Phosphat), Grenzwertüberschreitungen im Trinkwasser, Emissionen von Antibiotika, Energieverbrauch für Tieraufzucht, Logistik und Lagerung (Kühlung) → unterschiedliche Fleischsorten (Rind, Schwein, Geflügel, Kaninchen...) weisen allerdings unterschiedliche Werte bei den zu untersuchenden Umweltindikatoren auf und nicht in jedem Fall schneidet Fleisch gegenüber pflanzlichen Nahrungsmitteln bei einer vollständigen Ökobilanz schlechter ab.

cular Economy, wenn man alle eingesetzten Materialien als Bezugsgröße wählt. Dies wird noch weiter bestärkt, weil die Wachstumsrate des globalen Materialverbrauchs zwischen 1950 und 2010 durchschnittlich 3,6 % betrug [Schaffartzik-2014]. Für die Transformation hin zu einer Circular Economy ist Recycling ein wichtiger Baustein, wenn es wirtschaftlich, ökologisch und wettbewerbsgerecht erfolgen kann. Recycling wird es aber nicht allein richten können, weil erstens der Materialverbrauch an fossilen Energieträgern nach wie vor sehr groß ist und zweitens die globalen Materialbestände in langlebigen Produkten und Gebäuden stetig und schnell ansteigen (und dieses Material erst zeitverzögert zurückgewonnen werden kann). Der zunehmende Verzicht auf fossile Energieträger im Energiesystem verbunden mit dem gesteigerten Einsatz von erneuerbaren Energien würde die Zirkularität steigern helfen. Der Zugriff auf Materialbestände (anthropogene Lager) kann nur erfolgen, wenn zum einen zu jedem Zeitpunkt genügend Informationen über den verbauten Materialmix und die zugehörigen Materialmengen vorhanden sind und zum anderen Weiterverwendungsfähigkeit, Modularisierung, Komponentenertüchtigung, ein recyclingfreundliches Design und eine ökonomische Recyclingtechnologie zusammenkommen. Dies ist keine bahnbrechend neue Erkenntnis (vgl. z. B. [BMW-2015], [Wilts-2014]), aber sie ist das übereinstimmende Ergebnis zahlreicher systemanalytischer Untersuchungen.

9.5 Detaillierte Betrachtung der Hemmnisse und Zielkonflikte bei der Umsetzung der Circular Economy

9.5.1 Eignung der ausgewählten Stoffströme für verallgemeinernde Schlussfolgerungen

Bei den ausgewählten Stoffströmen handelt es sich um komplexe Produkte, bei denen eine Verwertung alles andere als trivial ist. Dennoch stehen sie exemplarisch für viele hochspezialisierte Produkte, wie sie heute in entwickelten Volkswirtschaften üblicherweise hergestellt werden, um eine große Wertschöpfung zu erzielen. Sie bilden daher eine gute Grundlage für die Analysen im Rahmen dieser Studie (Tabelle 9-1).

Die etablierten Produktkonfigurationen sind aufgrund der verwendeten Multi-Materiallösungen, irreversiblen Vernetzungen, komplexen Werkstoff- und Bauteilstrukturen sowie Stoffen, die das Recycling stören (legacy additives, fehlende Zulassung für geplante Sekundäranwendung etc.), bis heute nur eingeschränkt rezyklierbar. Die Lebensdauer aller Produkte liegt bei weit über einem Jahr, ist aber sehr unterschiedlich von regulatorischen, technischen oder konsumentenseitigen Aspekten bestimmt. Die Entsorgungslogistik ist für die drei Stoffströme sehr unterschiedlich weit entwickelt und geregelt. Die zu entsorgende Menge variiert zwischen einigen zehntausend bis einigen hunderttausend Tonnen pro Jahr. Die Verwertungswege sind teilweise etabliert, teilweise noch völlig unbekannt. Es dominieren eher energetische Verwertung oder Kaskadennutzung sowie das Recycling separierbarer Teilströme. Des Weiteren unterscheiden sich die drei Produkte vor allem in Bezug auf die Zielkonflikte, die bei einer Intensivierung des Recyclings in einer zirkulären Ökonomie zu erwarten sind.

Tabelle 9-1: Betrachtete Produkte/Stoffströme

Merkmal	Fahrzeugreifen	Rotorblätter von Windenergieanlagen	LCD-Bildschirme
Aufbau, Zusammensetzung	Komplexer Materialverbund	Eher einfacher Materialverbund	Komplexes Produkt aus vielen verschiedenen Komponenten und Materialien
Umlaufzeit/ Lebensdauer	Bis zu 8 Jahre, bestimmt von der Restprofiltiefe	I.d.R. nach 20 Jahren; je nach anlagenspezifischer Situation auch 15 – 25 Jahre; bestimmt von Materialermüdung oder Maßnahmen zur Effizienzsteigerung (Repowering)	Ca. 6,6 Jahre (Erst- und Zweitnutzung) [Buchert-2012]; bestimmt von Moden und Trends
Anfallstellen und Logistik	Deutschlandweite kostenpflichtige Abgabe in Werkstätten und auf Recyclinghöfen	Ungeregt, zeitlich- und räumlich stark schwankend; an Standorten der WEA; generell deutschlandweit, aktuell Schwerpunkt Norden	Erfassung durch öffentlich-rechtliche Entsorgungsträger und den Handel (gesetzlich im ElektroG geregelt) [ElektroG-2015]
Anfallmengen in Deutschland pro Jahr	568 000 t/a (2015)	Durchschnittlich 3 000 t/a zwischen 2012 und 2016	Ca. 17 000 t/a, 3 Millionen Stück. (2013), Schätzung nach [Sellin-2016] und [Elektrorecycling-2015]
Stand der Zirkularität	Kaskadennutzung und Sekundäranwendungen sind etabliert	Recyclingverfahren zur Trennung von Glasfaserverbundwerkstoffen nicht existent; energetisch-stoffliche Verwertung in Zementwerken	Recycling für Massen- und Edelmetalle sowie ausgewählte Kunststoffe; Recycling kritischer Metalle nicht wirtschaftlich (z. B. für Indium)
Potenzielle Zielkonflikte (Trade-offs)	Fahrsicherheit, Kraftstoffverbrauch, Lärmemission	Weiterbetrieb; Export von Altanlagen ins Ausland; mögliche Performanceverluste durch andere Rotorblattmaterialien	Geheimhaltungsbedarf der Hersteller bzgl. Aufbau und Zusammensetzung im globalen Wettbewerb; Produktsicherheit
Übertragbarkeit auf andere Stoffströme	Elastomerprodukte wie Dichtungen, Schwingungsdämpfer; Silikonprodukte für die Küche, elastische und geschäumte Polyurethanbauteile	Klassische glasfaserverstärkte Kunststoff (GFK)-Anwendungen wie Boote, Carports, Wohnwagen, Spielgeräte, andere carbonfaserverstärkte Werkstoffe wie CFK im Flugzeug- und Fahrzeugbau	Andere Elektro- und Elektronikgeräte bzw. -bauteile

Bei der Optimierung des Gesamtsystems müssen alle Lebenszyklusphasen berücksichtigt werden, da das Optimum einer einzelnen Phase nicht das Gesamt optimum für ein Produkt sein muss. Bei vielen Optimierungen müssen Trade-offs (Zielkonflikte) betrachtet werden, d. h. dass durch wechselseitige Abhängigkeiten häufig gegenläufige Effekte in Bezug auf ein gegebenes Zielsystem entstehen: Wird z. B. eine Produkteigenschaft optimiert, kann zugleich eine andere schlechter werden.

Konkrete Beispiele für Trade-offs (siehe auch Tabelle 9-1) sind bei Reifen ein möglicherweise höherer Kraftstoffverbrauch, verminderte Haftungseigenschaften oder erhöhte Lärmemissionen durch den Einsatz recyclingfreundlicherer Materialien. Bei Rotorblättern könnte die Substitution von GFK durch Metallbleche oder Holz zu Performanceverlusten hinsichtlich geringerer Windausbeuten der Anlagen in der (für die Energiewende entscheidenden) Nutzungsphase führen. Diese theoretisch möglichen Materialalternativen wären zwar in gut etablierten Verwertungsverfahren recycelbar, würden jedoch nach aktuellem Kenntnisstand nicht die gleichen Rotorblattlängen bei identischen Materialkennwerten erreichen. Bei LCD-Bildschirmen steht beispielsweise der Geheimhaltungsbedarf der Hersteller bezüglich Aufbau und Zusammensetzung im globalen Wettbewerb dem Informationsbedarf entgegen, der für die Entwicklung und vor allem großtechnische Implementierung von innovativen Recyclingverfahren erforderlich wäre. Dies gilt insbesondere für den Aufbau von Recyclingverfahren für nur in geringen Konzentrationen in den Altgeräten vorhandene, kritische Metalle. Ein weiterer Zielkonflikt kann im Bereich der Produktsicherheit bestehen. So ist es beispielsweise erforderlich, in bestimmten Bauteilen flammgeschützte Kunststoffe zu verwenden. Dies steht, je nach Art der für den Flammenschutz eingesetzten Substanzen, zum Teil der Recycelbarkeit dieser Monitorbestandteile entgegen. Der Einsatz anderer Materialien muss sorgfältig auf Performance, Umweltfreundlichkeit und Kosten geprüft werden.

Bei allen Entscheidungen zur Circular Economy sollten daher alle Lebenszyklusphasen berücksichtigt werden, um unerwünschte Trade-offs zu erkennen und soweit wie möglich zu vermeiden.

9.5.2 Technologische, ökonomische und ökologische Herausforderungen und Grenzen

Im Folgenden wird dargelegt, welchen Grenzen eine Circular Economy aus heutiger Sicht unterliegt (siehe Bild 9-4). Dabei sind die Grenzen nicht als unüberwindbare physikalische Grenzen zu verstehen, sondern als Limitierungen, die sich aus dem aktuellen Stand von Technik sowie aus den Anforderungen von Umweltschutz und den marktseitigen Rahmenbedingungen wie erzielbaren Preisen, Konsumentenerwartungen an die Produktperformance etc. ergeben. Die Überwindung oder das Verschieben dieser Grenzen erfordert – ggf. stimulierte – Innovationsprozesse.

Bild 9-4:
Grenzen und Herausforderungen einer
Circular Economy,
eigene Darstellung



Technologische Perspektive

Die Auswertung der beispielhaft ausgewählten Stoffströme zeigt eine Reihe von konkreten technischen Limitierungen auf. Dabei könnten zwar prinzipiell viele dieser Probleme durch ein rohstoffliches Recycling überwunden werden. Letztlich zerstört aber ein rohstoffliches Recycling sehr viele der Vorleistungen, die in ursprünglichen Produktionsprozessen oder natürlichen Wachstumsprozessen erbracht wurden, wodurch die ökologischen Vorteile des Recyclings in vielen Fällen aufgezehrt würden. Technische Grenzen, die einer Reparatur oder einem werkstofflichen Recycling entgegenstehen, werden daher im Folgenden als ernsthafte Hemmnisse für die Circular Economy beschrieben.

Wettbewerbsdruck oder Markttrends, Energie- und Ressourceneffizienz erfordern heute in vielen Fällen eine **durchsatzoptimierte oder miniaturisierte Produktgestaltung**. Dies spiegelt sich in der Produktgestaltung und dem Anforderungsprofil an die Produkte wider. Bauteile werden geklebt statt geschraubt, Elektronikkomponenten werden vergossen und die Einzelkomponenten werden so ineinander verschachtelt, dass die Raumausnutzung optimal ist. Vor allem bei elektronischen Konsumgeräten wie den immer flacher werdenden LCD-Bildschirmen oder mobilen Endgeräten, die einem Trend zur Miniaturisierung unterliegen, ist dies heute der Fall. Die Demontage des Produkts stellt damit keine spiegelbildliche Entsprechung des Zusammenbaus mehr da. Die Folge sind abnehmende Reparatur- und Rezyklierbarkeit.

Für eine hohe Festigkeit oder Elastizität von Bauteilen sind **vernetzte Werkstoffe** erforderlich. Viele Anwendungen lassen sich mit unvernetzten Werkstoffen bis heute nicht realisieren, in anderen geht man aufgrund von spezifischen Anforderungsprofilen dazu über, bislang unvernetzte Werkstoffe mit modernen Technologien zu vernetzen (bspw. strahlenvernetzte Polyethylene für Trinkwasserrohre). Die Vernetzung der Werkstoffe geschieht im Produktionsprozess, ist irreversibel und wirkt daher gleichzeitig einer Verwendung der Rezyklate als Substitute für Neumaterialien entgegen. In vielen Fällen können solche vernetz-

ten Rezyklate, die beim werkstofflichen Recycling erhalten werden, für die Neuproduktion gar nicht oder nur als eigenschaftsbeeinträchtigende Zuschlagsstoffe verwendet werden. Neben dem Gummi der Reifen und dem Epoxidharz der Rotorblätter gehören beispielsweise auch viele Kleb- und Dichtstoffe, wie sie auch in LCD-Bildschirmen zum Einsatz kommen, dazu.

Werkstoffe sind in den meisten Fällen **Gemische** aus mehreren Substanzen. Dabei gibt es in der Regel einen Hauptwerkstoff, der durch eine anwendungs- und häufig auch unternehmensspezifische Rezeptur mit Zusätzen (Additiven, Legierungselementen etc.) maßgeschneidert wird. Im Falle der Reifen sind dies beispielsweise Ruß, Silica, Mineralöle und Zinkoxid, die wichtige Eigenschaften des Reifens wesentlich mitbestimmen. Die Identifikation und Rückgewinnung dieser funktionalen Zusätze, die häufig molekular-, nano- oder mikrodispersiv im Werkstoff verteilt sind, ist im Rahmen der Verwertung kaum möglich. Letztlich unterliegen daher solche Werkstoffe im Rahmen des werkstofflichen Recyclings dauerhaft einer gleichmachenden Vermischung, die in vielen Fällen die Eignung für eine spezifische Anwendung vermindern wird.

Zahlreiche Funktionen von Waren sind mit Monomaterialien nicht realisierbar und erfordern **Verbundwerkstoffe** in Form von faserverstärkten Werkstoffen oder Multilayer-Materialien. Zu diesen Funktionen gehört ein geringes Gewicht bei hoher Festigkeit, wie es für die Rotorflügel und die Reifen wichtig ist, eine gute Barriere gegen Feuchte- und Gastransport beispielsweise bei Verpackungen oder elektronische oder optische Eigenschaften, wie sie bei den Glasscheiben von Monitoren benötigt werden. Ein wichtiges Ziel der Entwicklung solcher Verbundwerkstoffe ist dabei, eine möglichst innige und dauerhafte Haftung zwischen den Einzelkomponenten darzustellen. Dabei ist häufig die Haftung an der Grenzfläche besser als die Kohäsion innerhalb einer der beiden Einzelkomponenten, was eine vollständige und selektive Trennung durch mechanische Verfahren unmöglich macht. Vor allem natürliche Fasern, die vielfältige Verwendung zur Verstärkung in Verbundstoffen finden, sind häufig weder schmelzbar noch löslich und können daher analog zu den vernetzten Werkstoffen kaum recykliert werden, selbst dann, wenn sie aus den Verbundwerkstoffen separiert werden könnten.

Die Trennung von Gemischen und Verbünden in die Einzelstoffströme erfordert in vielen Fällen einen **Aufschluss und Trennung**. Die Aufschlussgrenze liegt heute bei vielen anorganischen Materialien bei einigen Mikrometern bis einigen hundert Nanometern, im Falle polymerer Werkstoffe liegt diese Grenze eher im Bereich einiger zehn bis hundert Mikrometer. Die Strukturierung der Werkstoffe durch Nano- und Mikropartikel oder -fasern sowie Dünnschichtverfahren liegt aber nicht selten mehrere Größenordnungen darunter, so dass ein Aufschluss nicht möglich ist. So können bei Altreifen und Rotorblättern zwar die Textil-, Stahl und Glasfasern aufgeschlossen werden, nicht aber Füllstoffe wie Silica oder Ruß. Ein mechanischer Aufschluss der Indium-Zinnoxid-Schichten aus LCD-Bildschirmen ist ebenso wenig möglich. Die Trennung von Mischfraktionen hat sich in den letzten Jahren vor allem durch verbesserte optische Sortierverfahren weiterentwickelt, dennoch liegt die Grenze für eine Sortierung heute noch deutlich oberhalb des erreichbaren Aufschlusses, so dass man das aufgeschlossene Gemisch häufig nicht trennen kann.

Materialien unterliegen **Alterungs- und Abbauprozessen** aufgrund von mechanischer Belastung, thermooxidativen, photochemischen oder biologischen Prozessen. Diese Prozesse finden während der Nutzungsphase jedoch auch bereits in der Produktion statt. Diese Prozesse können in der äußeren Erscheinung des Werkstoffs sichtbar werden (Patina, Rost, Risse, Bauteilversagen etc.), aber auch im nicht sichtbaren Bereich stattfinden und so zu einer schleichenden Verschlechterung der Werkstoffeigenschaften führen. Reifen beispielsweise verspröden im Laufe der Zeit und sollten daher auch ohne Erreichen der maximalen Fahrleistung nach ca. 7 Jahren ausgetauscht werden. Die Versprödung bleibt in den Sekundäranwendungen bestehen. Vor allem Kunststoffe verschlechtern ihre Eigenschaften, die sie nach der Synthese besitzen, vielfach bereits bei der nachfolgenden Weiterverarbeitung. Grund dafür ist eine thermisch-oxidative Zersetzung der Polymere. Es ist daher vor allem aus dem innerbetrieblichen Recycling von Produktionsabfällen bekannt, dass beim Recycling Frischmaterial im ausreichenden Maße zugeführt werden muss, um die Materialeigenschaften im tolerablen Qualitätsfenster zu halten.

Die durch Innovation vermutlich am schwierigsten zu überwindende technische Grenze stellen **dissipative Verluste** durch Verwitterung und Abrieb dar. Verwitterung und Abrieb werden in vielen Anwendungen bereits heute minimiert, da sie als Produkteigenschaften offensichtlich sind. Häufig sind sie aber im Rahmen eines Zielkonflikts bei der Eigenschaftsoptimierung von Werkstoffen nicht vollständig eliminierbar. Die Abriebsverluste von Reifen machen beispielsweise ca. 10 % der Gesamtmasse aus, sie hängen eng zusammen mit der guten Haftung, die Reifen benötigen. Dissipative Verluste erfordern vor allem eine ausreichende Abbaubarkeit in der Umwelt: Vor allem in den aquatischen Umweltsystemen ist solch eine Abbaubarkeit für die heutigen Werkstoffe aber nicht gegeben.

Ökologische Perspektive

Viele der oben beschriebenen technischen Limitierungen ließen sich durch eine Weiterentwicklung der Prozesse und Technologien zum Recycling überwinden. In den meisten Fällen ist dies aber mit einem **Anstieg des spezifischen Energie- und Rohstoffbedarfs** oder anderer negativer Umweltwirkungen für das Recycling verbunden, so dass man aus ökologischer Perspektive zum jeweiligen Stand der Technik den optimalen Rückgewinnungsgrad anstreben sollte, bei dem der ökologische Nutzen maximal ist. Besonders schwierig ist hierbei, dass diese Umweltwirkungen in Abhängigkeit von Bezugsraum, Zeit und Wertpräferenzen der Bewertenden stark variieren können. Eine absolute ökologische Grenze ist dort überschritten, wo der Aufwand zur Erzeugung und Weiterverarbeitung des Sekundärrohstoffs den des Primärrohstoffs überschreitet. Dies dürfte heute noch vielfach beim rohstofflichen Recycling der Fall sein. In diesen Fällen lässt sich eine Kreislaufführung allerdings mit Erwartung auf eine sich zukünftig verändernde Bewertung und der Notwendigkeit, einen Pfadwechsel rechtzeitig einzuschlagen, rechtfertigen. Gründe für eine solche sich zugunsten des Sekundärrohstoffs verändernde Bewertung können zum Beispiel in der Verknappung und Verarmung von Primärrohstoffquellen oder dem zunehmenden Einsatz von regenerativer Energie in der Sekundärrohstoffherzeugung liegen.

Aus ökologischer Perspektive ist insbesondere die **Anreicherung von** Schadstoffen und von Stoffen, die das Recycling stören, in den Kreisläufen ein limitierender Faktor für die Circular Economy. Dabei ist es seltener der Fall, dass ein Schadstoff absolut akkumuliert (z. B. wenn der Schadstoff seinen Ursprung in Hilfsstoffen für die Aufbereitung oder Produktion hat oder ein unerwünschtes Nebenprodukt in den entsprechenden Prozessen ist). Weitaus häufiger tritt eine Anreicherung von Schadstoffen dadurch auf, dass die Grenzwerte für Stoffe herabgesetzt werden oder die Einstufung von Stoffen sich ändert. Typische Beispiele dafür sind die Herabsetzung der Grenzwerte für polyaromatische Kohlenwasserstoffe (relevant für die Sekundäranwendungen von Altreifengranulat), das Verbot verschiedener Weichmacher auf Phtalatbasis oder die Neubewertung bromierter Flammschutzmittel (relevant für LCD-Bildschirme und andere elektronische Produkte). Gleichzeitig können Stoffe, die in der Nutzungsphase eine hohe Relevanz besitzen, beim Recycling störend sein (bspw. Flammschutzmittel).

Ein weiterer relevanter ökologischer Aspekt ist die Entstehung von **kritischen Emissionen** bei der Aufbereitung. In dem Maße, wie die mechanische Zerkleinerung zum Aufschluss von Multimaterialsystemen ausgeweitet wird, muss auch mit einem Anstieg staub- und gasförmiger Emissionen gerechnet werden. Kritisch sind hier vor allem die Erzeugung neuer faserförmiger Emissionen aus Faserverbundstoffen (insbesondere aus Arbeitsschutzgesichtspunkten) sowie die allgemeine Zunahme der Menge feinteiliger Werkstoffe, die sich infolge von Unfällen oder unsachgemäßen Reinigungsprozessen in einer weiteren Zunahme von Mikroplastik in der Umwelt niederschlagen könnten. Zu solchen kritischen Emissionen zählt auch die beim Recycling anfallende Menge zu beseitigender Materialien (Störstoffe, Anhaftungen, nicht-trennbare Reste etc. → Verbrennung, Deponierung). Der Anteil an gewonnenen Wertstoffen sollte größer sein als der Anteil des nach dem Recycling zu beseitigenden Abfalls.

Ökonomische Perspektive

Ein zentrales Hemmnis für die Umsetzung der Circular Economy sind **Zielkonflikte** zwischen der Kreislauffähigkeit einerseits und anderen Produkteigenschaften, vor allem solchen, die die Produktperformance aus Nutzersicht betreffen, andererseits. Abstriche in der Produktperformance verringern die Wettbewerbsfähigkeit, während einer verbesserten Kreislauffähigkeit heute kaum eine verkaufsfördernde Wirkung zugeschrieben werden kann. Inwieweit dies zukünftig durch Verbraucherinformationen, Produktlabels etc. erreicht werden kann und auch in einem globalisierten Markt durchsetzbar ist, ist offen.

Zwischen Sekundärrohstoffen und Primärrohstoffen besteht in vielen Fällen eine **Preiskopplung**. Zumeist sind die Preise für Sekundärrohstoffe niedriger, da sie nicht die gleichen Qualitäten wie die Primärrohstoffe erreichen. Sinken die Preise für die Primärrohstoffe, werden Verwertungsketten für Sekundärrohstoffe nicht selten vorübergehend unwirtschaftlich. Eine Entkopplung von Anfall und Bedarf durch längerfristige Zwischenlagerung ist für viele mittelständische Sammel- und Recyclingunternehmen wirtschaftlich nicht darstellbar.

Ergänzend zur Preiskopplung kommen Hemmnisse, die sich aus **Kuppelprodukten** ergeben. Kuppelprodukte fallen bei der Rohstoffgewinnung oder der

Produktion zeitgleich in einem festen Verhältnis an. Für solche Kuppelprodukte wäre eine parallele Entwicklung der Recyclingkapazitäten wichtig.

Im Weiteren gelten die Ausführungen zum optimalen Rückgewinnungsgrad aus ökologischer Perspektive für die ökonomische Perspektive analog. Steigt die Komplexität der Produkte soweit, dass die **Kosten für eine Aufbereitung** höher sind als die Kosten für eine Gewinnung aus Primärmaterialien, so ist eine absolute ökonomische Grenze erreicht. Die Entwicklung kreislauffähigerer Produkte oder die Weiterentwicklung von Reparatur oder Recycling können den optimalen Rückgewinnungsgrad erhöhen. Auch geänderte regulatorische, politische oder marktseitige Rahmenbedingungen können entsprechende Änderungen bewirken.

In vielen Fällen gehen vor allem in der Nutzungsphase aufgrund **fehlender Anreizsysteme** Stoffe verloren. Es gibt zwar Anreize für eine getrennte Entsorgung von lizenzierten Verpackungsabfällen, da diese die volumenabhängigen Gebühren für die Restmüllentsorgung verringern können. Gleiches gilt für elektrische und elektronische Kleingeräte (LCD-Bildschirme abhängig von der Größe), die unter bestimmten Bedingungen dem Handel zurückgegeben werden können. Es gibt aber keinerlei ökonomische Anreize, die ein Littering verringern würden. Weiterhin gibt es Waren, deren Entsorgung kostenpflichtig ist, so dass letztlich sogar das Littering belohnt würde (z. B. bei Reifen). In vielen Fällen wird dieses Marktversagen allerdings durch Pfandsysteme, Verbote oder kulturelle Werte im Umgang mit Abfällen kompensiert. Alternativen, die einen ökonomischen Anreiz zur Rückführung von Waren leisten, sind pfandbasierte Rücknahmesysteme, wie sie für Flaschen und Getränkedosen existieren. In vielen Fällen führen die Ausgestaltung der Rücknahmesysteme sowie die Frage, ob die Rückführung einen sinnvollen Beitrag zu einer Kreislaufwirtschaft leistet, zur Verunsicherung der Konsumenten. Gleichzeitig fehlen aber auch auf der Unternehmensseite Anreizsysteme, die einen erhöhten Rezyklatanteil in den Produkten befördern oder eine verbesserte Reparierbarkeit und Überholung attraktiv erscheinen lässt. Heutige gesetzlich geregelte Gewährleistungsansprüche seitens des Verbrauchers oder freiwillige Garantieverprechen der Hersteller führen dazu, dass die Produkte auf eine Defektfreiheit in den zugesicherten Zeiträumen hin optimiert werden. Für eine darüber hinausgehende Reparierbarkeit inklusive der notwendigen Logistik und Verfügbarmachung von Ersatzteilen bestehen keinerlei Anreize. Das System aus Gewährleistung muss ggf. regulatorisch neue Anreize zur Integration von Langlebigkeit (z. B. von Druckern), Reparierbarkeit und Rezyklierbarkeit erhalten. Einen Ansatz zur Änderung des Konsumverhaltens und Steigerung der Langlebigkeit von Produkten verfolgt Schweden: Das Land plant, den Mehrwertsteuersatz für Reparaturen zu senken [SPON-2016].

Vor allem bei sehr langlebigen Produkten wird die **fehlende Prognostizierbarkeit** des Anfalls zum unternehmerischen Risiko, insbesondere da der unmittelbar ersichtliche Zusammenhang zwischen einer parallelen Investition in die Produktions- und Verwertungstechnik fehlt. Gleichzeitig ist die ökonomische Triebkraft für eine kreislauffähige Produktgestaltung gering, da die Rückführungsdauer weit oberhalb typischer Zeiträume für die Produktentwicklung und Standortplanung liegt.

9.6 Impulse für eine Circular Economy

9.6.1 Innovationsbedarf und neue Geschäftsmodelle für die Circular Economy

Die Herausforderungen einer Circular Economy erfordern Innovationsprozesse und Innovationen, die gleichzeitig auch eine Basis für neue Geschäftsmodelle bieten. Im Rahmen der vorliegenden Studie werden diese im Folgenden nur grob umrissen.

- Kriterien wie Rezyklierbarkeit, Reparierbarkeit und Langlebigkeit sind in der heutigen Waren- und Materialwelt allenfalls eine Nebenbedingung oder ein Verkaufsmerkmal für nachhaltigkeitsaffine Milieus. Eine umfassend realisierte Circular Economy schafft daher die Grundlage für eine Transformation in der Produktgestaltung, hat gleichzeitig aber auch das Potenzial, als Startpunkt für eine Ausweitung von Fertigungskapazitäten in Deutschland) zu wirken. Die additive Fertigung, die Konzepte wie Spare-Parts-on-Demand ermöglicht, kann hier eine Schlüsselrolle spielen. Vor allem Produkt- und Industriedesigner, Verarbeiter von Werkstoffen und Produkthersteller würden von dieser Entwicklung profitieren.
- Eine Verbesserung der Kreislaufführung wird durch eine zunehmende Substitution vernetzter Werkstoffe und nicht trennbarer Verbundwerkstoffe begünstigt. Daraus ergeben sich Innovationspotenziale für physikalisch reversibel vernetzte Werkstoffe, für Additive, die eine schaltbare Trennung der Komponenten von Verbundwerkstoffen (Debonding on Demand) ermöglichen oder für einen Ersatz komplexer Stoffgemische durch Einstoffsysteme, welche durch eine innere Strukturierung funktionsäquivalent werden (Single-Material-Composites). Im Zusammenhang mit dissipativen Verlusten und umweltoffenen Anwendungen sind neue Konzepte zur Abbaubarkeit in verschiedenen Umweltmilieus gefragt, die weit über die heutigen Anforderungen in etablierten Kompostierungsstandards hinausgehen. Im Idealfall wäre eine solche Bioabbaubarkeit zum Ende der Nutzungsdauer schaltbar. Diese Herausforderungen betreffen vor allem die chemische Industrie und bieten hier Potenziale für zahlreiche Innovationen.
- In vielen Anwendungen sind die Zielkonflikte so hoch, dass man nicht auf vernetzte Werkstoffe und leistungsfähige Verbundwerkstoffe verzichten wird, es sind daher neue und effizientere Lösungen für das chemische oder rohstoffliche Recycling erforderlich. In der Vergangenheit sind viele dieser Ansätze gescheitert, da sie dem ökonomischen und ökologischen Vergleich mit anderen Verwertungsoptionen nicht standhalten konnten. Eine Forcierung dieses Weges ist daher nur dann sinnvoll, wenn es neue technische Ansätze für die Erhöhung des Rezyklatanteils in Produkten gibt und der Weg durch Bilanzierung und Bewertung begleitet wird, um kritische Entwicklungspfade frühzeitig zu erkennen.
- Wenn eine Circular Economy im großen Umfang betrieben wird, besteht ein großer Bedarf für neue effizientere Sammelsysteme. Diese müssen dazu geeignet sein, die EoL-Stoffströme möglichst schnell und bedarfsgerecht in die optimalen Verwertungswege einzuspeisen. Dazu sind weiterhin auch Systeme interessant, die die lebenszyklusweite Identifikation von Produkten bis hin zu Materialien ermöglichen. Diese bestehen in der Regel aus einem

chemischen Marker und einem Lesegerät, das diesen erkennt. Gleichzeitig können diese Marker auch dazu dienen, den Rezyklatanteil in Produkten (»recycled content«) zu bestimmen. Begleitet werden könnte dies durch ein virtuelles Materialkataster, welches hilft, die Vielfalt der Stoffströme, den zeitlich versetzten Bedarf und Anfall zu managen (vgl. Kap. 9.7). Auf diesem Gebiet bieten sich zahlreiche neue Optionen für Logistiker, Hersteller von Erkennungssystemen sowie Softwareentwickler an.

9.6.2 Politische und regulatorische Treiber für die Circular Economy

Bei den in den Legislativvorschlägen der EU festgesetzten Verwertungsquoten handelt es sich um mengenbasierte Vorgaben. Insbesondere für die von der Europäischen Kommission als wichtig erachteten kritischen Rohstoffe stellt dieses Vorgehen jedoch ein Problem dar, da sich Recyclingverfahren und -prozesse zum Zweck des Erreichens der Quotenvorgaben vorwiegend auf Massenmetalle konzentrieren. Rohstoffe, die nur in geringen Mengen enthalten, für die Wirtschaft aber teilweise von erheblicher Bedeutung und oftmals mit Versorgungsrisiken behaftet sind, fallen durch dieses mengenbasierte Raster.

Einheitliche Qualitätsstandards für Sekundärrohstoffe sind ein mögliches Instrument, um ihren Einsatz auszuweiten und damit Primärressourcen zu schonen. Dies gelingt allerdings nur, wenn sie den Primärrohstoffen in ihrer Qualität und Preis äquivalent hergestellt werden können. Andernfalls besteht die Gefahr, dass aufwändig hergestellte Sekundärrohstoffe entweder gar nicht oder in einer neuartigen Sekundäranwendungen zum Einsatz kommen, durch die weder Rohstoffe substituiert noch ein Beitrag zur Zirkularität des Gesamtsystems geleistet wird. Garantierte Qualitäten für Sekundärrohstoffe sind mit einem hohen Aufwand verbunden. Hier könnte eine praxistaugliche Abstimmung und Harmonisierung der relevanten Rechtsbereiche Erleichterung und Rechtssicherheit verschaffen.

Die bisherigen regulatorischen Ansätze zur Circular Economy setzen vor allem bei den Recyclingquoten für den EoL-Abfall an. Dies erinnert an die Grenzwertsetzungen der nachsorgenden Umweltpolitik in den 1990er-Jahren, welche ausufernde End-of-Pipe-Technologien hervorgebracht haben, bevor man sich dann dem vorsorgenden Umweltschutz und produktions- sowie produktintegrierten Maßnahmen zuwandte, die zudem für die Unternehmen in der Regel wirtschaftlicher waren. Auch eine regulierte Circular Economy sollte sich zuerst den Inputfragen stellen, bevor man Recyclingquoten für Abfälle anhebt. Letztere sollten eher keine Indikatoren zur Steuerung, sondern zur Erfolgsmessung sein. Besser steuern ließe sich die Circular Economy über den »recycled content« und das – zu entwickelnde – Maß an Zirkularität von Produkten. Für beide Faktoren gibt es derzeit keine marktwirtschaftlichen Anreize. Gleiches gilt für kreislauffähiges Produktdesign.

Ferner sollten regulatorische Impulse bzw. die konsequente Anwendung bestehender Regularien den Export von Abfällen, die heute als funktionstüchtige Produkte deklariert werden, vermeiden. Es ist bekannt, dass viele Elektro- und Elektronikgeräte in Entwicklungs- und Schwellenländern unter katastrophalen Arbeitsbedingungen mit geringer Effizienz aufbereitet werden. Viele Wege und Prozesse sind gänzlich unbekannt. Die in der Novelle des ElektroG verankerte

Beweislastumkehr, um zwischen dem Export von Gebrauchtgeräten und unerwünschten Abfallexporten in Regionen mit niedrigeren Umwelt- und Arbeitsschutzstandards zu unterscheiden, ist hier ein wichtiger Schritt in die richtige Richtung.

Den Forderungen nach Wieder- und Weiterverwendung sowie höheren Recyclingquoten stehen auf der anderen Seite steigende Anforderungen bei Produkthaftung sowie Qualitäts- und Umweltstandards entgegen. In Frankreich wurde z. B. ein neues Gesetz erlassen, das langlebige Produkte und Reparatur fördern soll. Dazu gehört eine Verpflichtung der Hersteller, bereits in der Produktinformation offenzulegen, wie lange Ersatzteile verfügbar sind. Zudem verlängert sich die Beweislast des Verkäufers auf zwei Jahre, d. h. der Verkäufer – und nicht der Kunde – muss nachweisen, dass das Produkt beim Kauf keinen Defekt hatte [Reparatur-2016].

Detaillierte Informationen zu den einzelnen, im Rahmen des Aktionsplans der EU für die Kreislaufwirtschaft angestrebten, Maßnahmen sowie zu den Legislativvorschlägen sind in Kapitel 8.2 aufgeführt. Diese lassen sich wie folgt zusammenfassen [EC-2015a], [EC-2015c], [EC-2015d], [EC-2015e], [EC-2015f], [EC-2015g]:

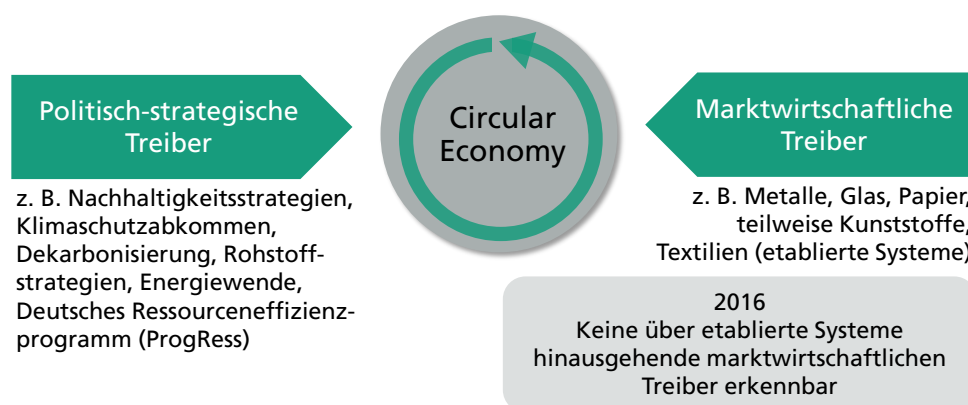
- Die Ausweitung der Ökodesign-Richtlinie auf die Aspekte Reparierbarkeit, Langlebigkeit, Nachrüstbarkeit und Rezyklierbarkeit soll zu einer Vermeidung und hochwertigeren Verwertung von Abfällen beitragen.
- Dem Verbraucher sollen produktbezogene Umweltinformationen zur Verfügung gestellt werden, um diese sowohl bei der Kaufentscheidung als auch während der Nutzungsphase berücksichtigen zu können (z. B. Reparierbarkeit, recycled content). Ziel ist es dabei, langlebige, umweltfreundliche und innovationsoffene Produkte im Markt zu etablieren.
- Das Recycling soll gesteigert und eine Deponierung von Siedlungsabfällen eingeschränkt werden. Die in den Legislativvorschlägen genannten Maßnahmen umfassen dabei Vorgaben zu Verwertungsquoten für Bau- und Abbruchabfälle sowie Siedlungs-, Verpackungs- und Kunststoffabfälle, sehen aber auch eine Reduzierung der auf Deponien abgelagerten Siedlungsabfälle auf maximal 10 % im Jahr 2030 vor. Darüber hinaus sind eine separate Erfassung von Bioabfällen sowie eine Kaskadennutzung von Biomasse vorgesehen.
- Zur Steigerung des Anteils der Sekundärrohstoffe in Produktionsprozessen sollen EU-einheitliche Qualitätsstandards für bestimmte Sekundärrohstoffe ausgearbeitet werden.
- Die Umsetzung der angestrebten Maßnahmen soll durch Forschungs- und Innovationsförderung unterstützt und beschleunigt werden. Darüber hinaus ist beabsichtigt, die Wirksamkeit der Maßnahmen und deren Fortschritte anhand aussagekräftiger Indikatoren zu überprüfen.

Diese hier nur in Auszügen dargestellten Maßnahmen sollen dazu beitragen, den Aspekten Abfallvermeidung, Wiederverwendung und Recycling zukünftig mehr Gewicht zu verleihen und Verwertungs- und Beseitigungsmengen zukünftig deutlich zu reduzieren.

9.7 Der Transformationsprozess zur Circular Economy

Zirkularität beschreibt das Verhältnis im Kreislauf geführter Stoffströme zu allen in einer Volkswirtschaft oder volkswirtschaftlichen Region verarbeiteten Stoffströmen und ist ein Qualitätsmerkmal einer Circular Economy. Die nur auf den EoL-Abfall bezogene Recyclingquote ist – wie bereits erläutert – lediglich eine Hilfsgröße zur Bestimmung der Qualität von Circular Economies. Eine Transformation zu einer Circular Economy bedeutet den Übergang eines Systems von einem Zustand geringer Zirkularität²⁸ zu einem mit höherer Zirkularität²⁹. Eine solche Zustandsänderung stellt sich nicht von selbst ein, sondern benötigt Triebkräfte bzw. Treiber, die aus dem marktwirtschaftlichen und/oder politisch-strategischen Bereich kommen können (vgl. Bild 9-5).

Bild 9-5:
Treiber für die Transformation zu einer Circular Economy, eigene Darstellung



Marktwirtschaftliche Treiber sind u. a. Preise und Verfügbarkeiten von Rohstoffen sowie die Herausforderungen des Innovationswettbewerbs. Politisch-strategische Treiber entstehen durch gesellschaftspolitische Willensbildung. Sie basieren u. a. auf wissenschaftlichen Ergebnissen, der Neubewertung von Sachverhalten im Lichte neuer Erkenntnisse und der öffentlichen Meinungsbildung. Beispiele für solche Treiber sind die Umsetzung der Energiewende in Deutschland, die Verabschiedung von Klimaschutzabkommen oder das Verfolgen einer Nachhaltigkeitsstrategie. Politisch-strategische und marktwirtschaftliche Treiber können, müssen aber nicht komplementär zueinander sein. Wenn Maßnahmen zwar politisch-strategisch gewollt sind, sich aber ökonomisch nicht rechnen, beginnen in der Regel Verhandlungen darüber, wie die Kosten der Transformation finanziert und verteilt werden sollen.

Vor diesem Hintergrund kommt diese Studie zu dem Schluss, dass zumindest in Deutschland aktuell keine marktwirtschaftlichen Treiber erkennbar sind, welche die Zirkularität der Circular Economy über das Maß der vorhandenen Systeme für Kreisläufe von Produktions- und EoL-Abfall hinaus steigern würden. Dies liegt vor allem an folgenden Gründen (vgl. auch [BMWI-2015]):

²⁸ Dieser Zustand kann durchaus ein temporäres stabiles Gleichgewicht darstellen.

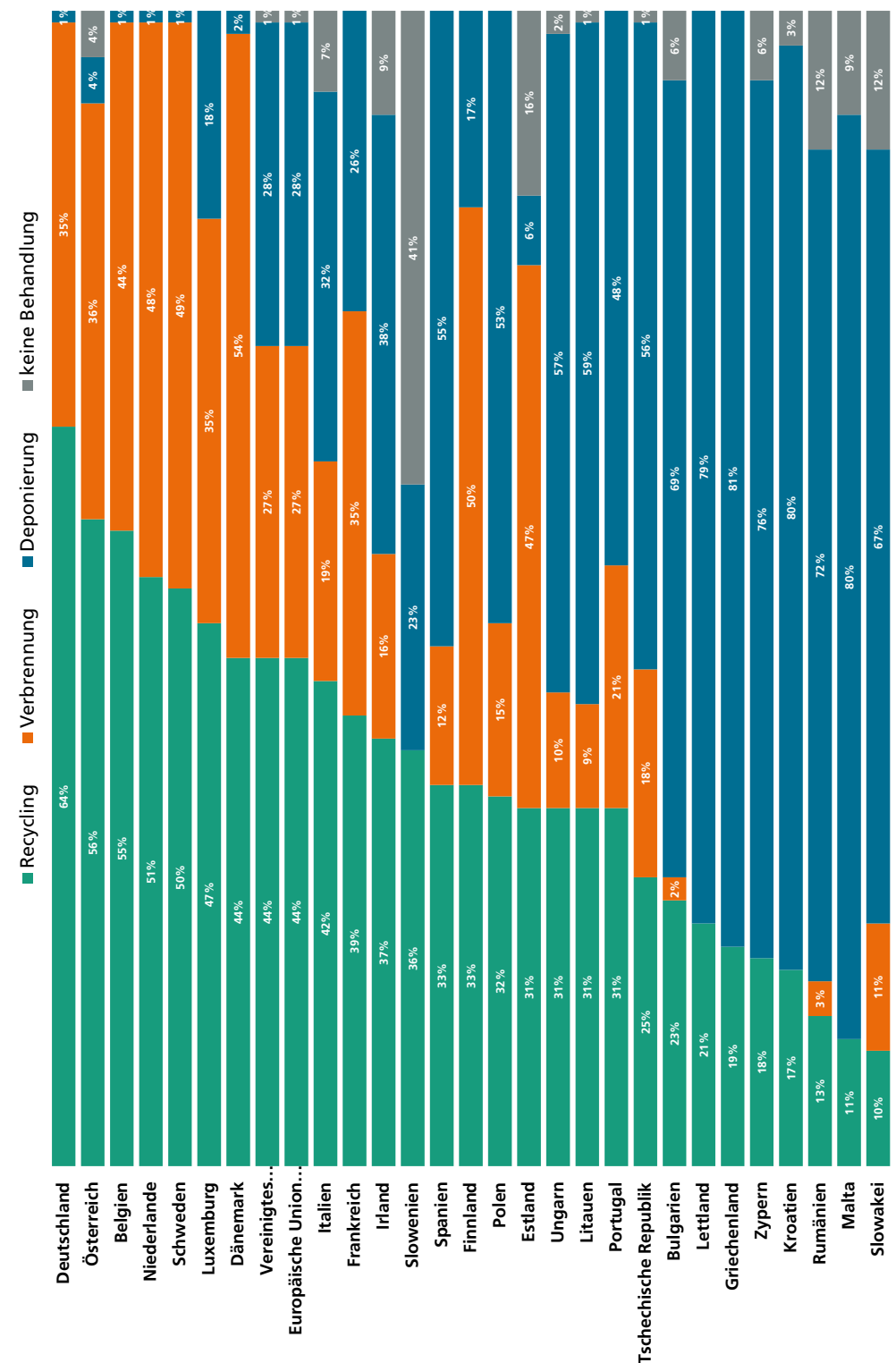
²⁹ Als neuem Gleichgewichtszustand

- 1) Zum aktuellen Zeitpunkt gibt es in Deutschland kein wirtschaftliches Recycling für Verbundstoffe oder Technologiemetalle aus EoL³⁰-Produkten. Weder Recyclingmöglichkeiten noch der Bedarf an Recyclingprodukten sind verbreitet vorhanden bzw. sie lassen sich nur mit großen Unsicherheiten ermitteln
- 2) Der heutige Rohstoffbedarf wird über (aktuell kostengünstige und ausreichend verfügbare) Primärrohstoffe und relativ »einfach« zu recycelnde Produktions-/EoL-Abfälle bedient [BGR-2016]. Wirtschaftlich herzustellende Sekundärrohstoffe sind in bestehenden Systemen gebunden, Nischen sind noch vorhanden, zugehörige Logistik- und Aufbereitungssysteme müssen erst noch entwickelt werden.
- 3) Viele Länder in der EU weisen im Gegensatz zu Deutschland noch großes Entwicklungspotenzial in Bezug auf Recycling und die Prinzipien der Circular Economy auf (vgl. Bild 9-6) [IW-2016]. Die Umgestaltung der dort auf Beseitigung/Ablagerung ausgerichteten Abfallwirtschaft wäre ein erster Schritt zur Circular Economy und Angleichung der Standards in der EU.
- 4) Die statische Reichweite von fossilen Energieträgern und metallischen sowie nicht-metallischen Rohstoffen liegt für die sicher zugänglichen Reserven bei einhundert bis mehreren hundert Jahren, unter Einbezug der Ressourcen bei bis zu 1 000 Jahren³¹ [BGR-2006], [Faulstich-2010], [UNEP-2016]. Eine Wirtschaft auf dem gegenwärtigen Zirkularitätsniveau könnte demzufolge noch lange fortbestehen.
- 5) Verfahrensentwicklungen aus der Forschung zur Rückgewinnung von Stoffströmen aus Verbundkonstruktionen oder von Technologiemetallen gelangen aufgrund fehlender Wirtschaftlichkeit und großer Marktunsicherheiten bezüglich ihrer langfristigen Verfügbarkeit nur vereinzelt vom Labor-/Technikumsmaßstab in die großtechnische Anwendung. Damit fehlen wichtige Betriebserfahrungen.

³⁰ EoL: **End-of-Life**; in geringem Umfang findet ein produktionsintegriertes Recycling aus Effizienzgründen statt

³¹ Diese rechnerische Größe allein sagt nichts über Verfügbarkeiten und Preise auf den Märkten aus, welche auch von politischer und unternehmerischer Einflussnahme abhängen.

Bild 9-6:
Quoten der Kreislaufwirtschaft für EoL-Abfall in Europa, nach [IW-2016][



Für eine *kurzfristige* Perspektive zum heutigen Zeitpunkt würden als wenig vorausschauende Handlungsempfehlungen resultieren:

- Weitere Beobachtung der Märkte und der Rohstoffverfügbarkeit (primär, sekundär) für die relevanten Rohstoffe (z. B. durch die BGR/DERA)

- Regelmäßige Befragungen zur Rohstoffversorgung und Bezugslage durch den VCI, BDI, den ZVEI und andere Branchenverbände bei ihren Mitgliedern
- Fortlaufende Dokumentation und Auswertung nationaler und internationaler Forschungsergebnisse sowie der internationalen Schutzrechtslage, um bevorstehende Technologiesprünge frühzeitig zu erkennen
- Erneute Beschäftigung mit dem Thema »Circular Economy« erst bei Anzeichen einer erneuten Verknappung bzw. sprunghaften Preisanstiegen bei primären Rohstoffen (z. B. mittels dann durchzuführender Stakeholderdialoge mit der betroffenen Industrie und der Wissenschaft)

Als mögliche Folge eines solchen Vorgehens würde zum Zeitpunkt einer reduzierten Rohstoffverfügbarkeit oder schnellerer Wettbewerber der dann vorhandene Entwicklungsstand heimischer Rückgewinnungsverfahren dem heutigen Stand (überwiegend Labormaßstab) entsprechen. Die Kompetenz und die Netzwerke für eine direkte Anknüpfung an den heutigen Kenntnisstand wären möglicherweise durch unvollständige Dokumentation der Ergebnisse, fehlende Entwicklungskontinuität und Fluktuation der Wissensträger nicht mehr ausreichend vorhanden. Forschungsarbeiten müssten ggf. zu diesem Zeitpunkt neu aufgenommen werden, um die nächsten Entwicklungsschritte gehen zu können. Hierdurch würde ein Zeitverzug entstehen, der einer direkten Kompensation fehlender Primärrohstoffe durch Sekundärrohstoffe entgegensteht. Daraus könnte im Ernstfall eine physische Rohstoffverknappung für die deutsche Wirtschaft resultieren. Ein Ausweg wäre dann, Rohstoffe *und* Recyclingverfahren auf dem internationalen Markt – wahrscheinlich zu hohen Preisen – einzukaufen und/oder die Substitutionsforschung ad hoc zu intensivieren.

Die nachfolgenden Vorschläge sind daher als *systemorientierte Vorschläge* zu verstehen, die zum *mittel- bis langfristigen Kompetenzerhalt/-aufbau* und zur schrittweisen Implementierung einer Circular Economy mit gesteigerter Zirkularität beitragen, um die Rohstoffversorgung der deutschen Wirtschaft widerstandsfähiger gegen plötzliche Preisanstiege und volatile Marktbedingungen zu machen und auf den globalen Wettbewerb beim Aufbau von Circular Economies vorbereitet zu sein. Diese Maßnahmen sollten in nachfolgenden Dialogprozessen weiter geschärft und priorisiert sowie zu einer Roadmap weiterentwickelt werden.

Die Maßnahmen für eine mögliche Transformation hin zu einer Circular Economy sind für Stoffströme und Produkte auf einer makroskopischen, strategischen Ebene in der Literatur beschrieben (z. B. [Allwood-2011], [Haas-2015], [MWEIMH-2016], [Paech-2012]). Die in dieser Studie untersuchten Beispielprodukte zeigen, dass es meist komplex aufgebaute, aus einem innovativen Materialmix zusammengesetzte Produkte sind, die hochwertige Funktionen zu einem hohen Marktpreis bereitstellen, sei es im Elektronik-, Mobilitäts-, Gebäude- oder Energiesektor. Oft handelt es sich um langlebige Produkte (Lebensdauer länger als ein Jahr). Darauf basiert auch der Wettbewerbsvorsprung eines Industrielandes wie Deutschland. Die dafür erforderlichen Produktionstechnologien sind hoch entwickelt, die Recyclingtechnologien sind es eher nicht.

Auf der Produktionsseite werden ausgefeilte Hightech-Technologien entwickelt und eingesetzt: diesen stehen auf der Recyclingseite relativ grobschlächtere Lowtech-Technologien (Zerkleinern, Sortieren, Klassieren) gegenüber, die auf einfach zugängliche Massenmaterialien (auch wegen der gesetzlichen Recyclingquoten) ausgelegt sind. Eine technologische Verknüpfung beider Welten findet nicht statt, weil sich daraus kein wirtschaftlicher Vorteil ziehen lässt. Solange sich Preise und Verfügbarkeiten von Rohstoffen in einem akzeptablen Toleranzrahmen bewegen, setzen Unternehmen Primär- anstatt möglicherweise Qualität mindernde Sekundärrohstoffe ein.

Nur dort, wo Sekundärrohstoffe einen Kostenvorteil gegenüber Primärrohstoffen aufweisen (Metalle, Glas, Papier, teilweise Kunststoffe), haben sich langjährige, eigenständige und wirtschaftlich funktionierende Recyclingsysteme etabliert – der Impuls war hier die Wirtschaftlichkeit. Wo das nicht der Fall war oder ist und der Staat eine Kreislaufwirtschaft regulatorisch durchgesetzt hat (z. B. Verpackungsverordnung), wird die Circular Economy durch Gebühren³² der Konsumenten oder Umlagen (Erneuerbare-Energien-Gesetz) finanziert. Rein marktwirtschaftliche Impulse für eine Circular Economy sind an vielen Stellen nicht erkennbar. Wirtschaftliches, ggf. auch hochtechnisiertes Recycling kann nur in enger Kooperation zwischen Grundstoffherstellern, Produzenten und Recyclern erfolgen, wobei gleichzeitig auch zirkuläre Wertschöpfungsnetzwerke entstehen können.

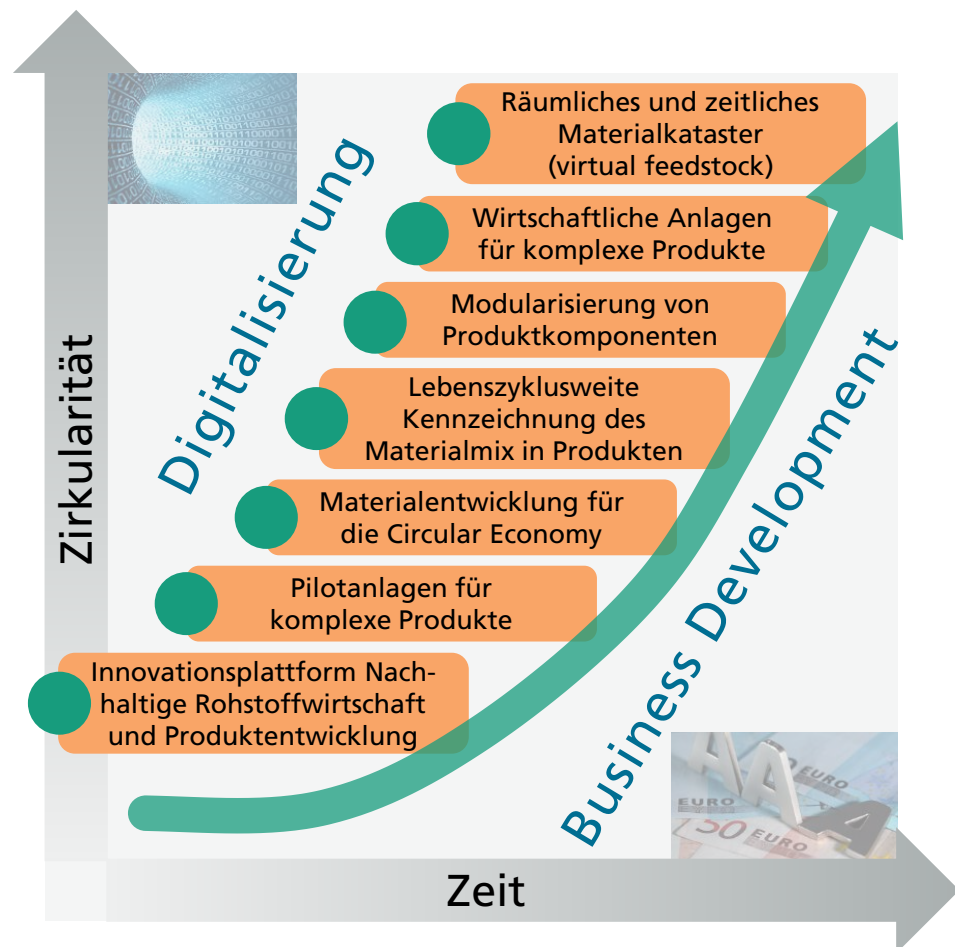
Maßnahmen zur Steigerung der Zirkularität in Industrieländern können sein (vgl. Bild 9-7):

- Austausch und Synergien zwischen Primär- und Sekundärproduzenten, Grundstoffherstellern, Produzenten, Industriedesignern und Entsorgern fördern (»Öko-Design«); im Bereich des Recyclings auch direkt zwischen klassischen Entsorgern und Grundstoffindustrie (Chemie, Pyrometallurgie etc.) → Entwicklung einer nationalen/europäischen *Innovationsplattform »Nachhaltige Rohstoffwirtschaft und Produktentwicklung«*
- Öffentlich oder durch PPP finanzierte Pilot-/Demonstrationsanlagen für heute nicht (wirtschaftlich) recycelbare Stoffströme mit Recyclingpotential (»advanced recycling technologies«) → Kompetenzgewinn und -vermarktung
- Forschungsprogramme zur Material- und Produktentwicklung für die Circular Economy sowie Kriterien zur Messung von Zirkularität → Wie müssen Materialien beschaffen sein, damit sie den Kreislaufprinzipien entsprechen (z. B. schaltbar bioabbaubare Polymere) und wie kann ihre Zirkularität gemessen werden?
- Lebenszyklusweite Kennzeichnung und jederzeit auslesbare, zertifizierte Informationen über stofflichen Inhalt von Produkten und Sekundärrohstoffen (Materialmix, Materialmenge, Qualität), um deren Recyclingpotenzial ggf. später erschließen zu können und deren Recyclinganteil als Verkaufsargument zu nutzen (»recycling content«) unter Berücksichtigung von Aspekten des Schutzes geistigen Eigentums. Der zugehörige Prozess muss zwischen Stakeholdern ausgehandelt werden.

³² Gebühren, die im Produktpreis enthalten sind.

- Modularisierung von Produktkomponenten (Austausch, Reparierbarkeit, Refurbishment, Gewinnung von Massenstoffen)
- Realisierung von wirtschaftlich arbeitenden Recyclinganlagen für komplexe Produkte (auf Basis des Kompetenzgewinns)
- Aufbau eines digitalen, zeitlichen und räumlichen Katasters des stofflichen Inhalts von langlebigen Produkten (virtual feedstock) → Optimierung von Produktentwicklung, Recyclinglogistik, Aufbau regionaler Wertschöpfung und Digitalisierung der Circular Economy etc.

Bild 9-7:
Maßnahmen zur Stei-
gerung der Zirkularität
von Industrieländern,
eigene Darstellung



Die Zusammenarbeit von Akteuren entlang und zwischen Wertschöpfungsketten zur Entwicklung von gemeinsamen Innovationsprozessen ermöglicht integrierte Material- und Produktentwicklung, die sich an den Adjektiven »nachhaltig« und »kreislauffähig« orientiert. Hier können Kompetenzen sowie Erfahrungen gebündelt und Innovationsprojekte entwickelt werden. Hierdurch entsteht eine dauerhafte und wachsende Wissensbasis für die Circular Economy. Dabei wird es auch darum gehen, attraktive Nischen für Stoffströme aufzuspü-

ren, die noch nicht in etablierten Recyclingsystemen³³ gebunden sind (vgl. Bild 9-8 und daraus wertschöpfende Produkte zu machen (Business Development).

Bild 9-8:
Nischengeschäfte in der
Abfallwirtschaft können die Transformation
zu einer CE fördern
[VDIN-2014]



Seit 2012 haben Forschungs- und Entwicklungsprojekte zum Recycling von Technologiemetallen sowohl auf nationaler wie auch auf europäischer Ebene nennenswert zugenommen. Demnach müsste mittlerweile das wissenschaftlich-technische Know-how deutlich angewachsen sein. Die entwickelten Technologien haben jedoch kaum einen Technology Readiness Level (TRL) von 4 bis 5 erreicht, sind also von einer industriellen Umsetzung noch entfernt. Um diese Lücke zu schließen, muss in der Technologieentwicklung in der Regel die Skala »Demonstrationsmaßstab« erreicht werden. Aufgrund der stark gefallen Preise für Primärmaterialien sowie der starken Preisschwankungen kann eine wirtschaftliche Rückgewinnung von Technologiemetallen oder anderen »Minorkomponenten« häufig nur erfolgen, wenn neben diesen Rohstoffen auch andere Wertstoffe gewonnen werden, welche die Deckungsbeiträge für den wirtschaftlichen Betrieb des Gesamtverfahrens liefern. Neben den Erlösen für die Produkte müssen allerdings auch die Entsorgungskosten für verbleibende Reststoffe berücksichtigt werden. Da gerade z. B. Technologiemetalle und Fasern nur in kleineren Mengen bzw. Konzentrationen vorhanden sind, können auch die Reststoffmengen sehr groß werden. Hier können auch vermeintlich geringe Entsorgungskosten zu Kostentreibern werden [BMW-2015]. Pilotanlagen zum Recycling komplexer Produkte, die später in wirtschaftlich arbeitende Anlagen überführt werden, sind die Grundlage für einen Kompetenzvorsprung.

Wegen Unsicherheiten bei der Entwicklung von Sekundärrohstoffmärkten ist eine rein privatwirtschaftliche Investition in Demonstrationsanlagen zur Erschließung des möglichen Recyclingpotenzials oder in neue, kreislauffähige Materialien eher unwahrscheinlich. Um das unternehmerische Risiko zu reduzieren und Anschubhilfe für Demonstrationsanlagen zu leisten, kann die Begleitung durch fokussierte öffentliche Fördermaßnahmen (auch als PPP-Konstruktionen) erforderlich sein.

Die benötigten Projektmittel sind bei Demonstrationsprojekten allein aufgrund der Anlagengrößen höher als bei klassischen Forschungsprojekten im Labor-

³³ Dies gilt auch für entstehende Rohstoffe wie CO₂ (vgl. auch [Enquete-2015b]).

maßstab. Des Weiteren können je nach Projektgestaltung unterschiedliche fachliche Themengebiete betroffen sein. Das höhere finanzielle Risiko aufgrund des höheren Projektvolumens sowie mögliche thematische Überschneidungen könnten durch *ressortübergreifende* Förderinstrumente oder *ressortübergreifende* Abstimmungen abgefangen werden. Allerdings sollte das Risiko hoher Fördersummen durch eine sorgfältige Auswahl der zu fördernden Projekte begrenzt werden. In den Förderanträgen sollte nachvollziehbar dargelegt werden, dass ein entsprechender Technologielevel für eine praktische Umsetzung erreicht ist bzw. plausibel erreicht werden kann und wie die Voraussetzungen für eine Kommerzialisierung (Business Development) geschaffen werden können.

Wenn der größte Teil der verarbeiteten Materialien in langlebige Produkte geht, dann müssen diese Produkte auch nach langer Zeit noch Auskunft über ihren Materialbestand und Materialmix geben. So könnten dann Recyclingsysteme über einen längeren Zeitraum geplant und intelligent gesteuert werden (vgl. Industrie 4.0, Digitalisierungsstrategie für die Circular Economy [Deerberg-2016]). Langfristig können aus solchen zertifizierten Produktdatenbanken räumlich und zeitlich auflösbare Kataster der in Produkten verbauten Materialien werden, die dann die Funktion eines »virtual feedstocks« erfüllen. Die obligatorische Angabe eines »recycling content« kann Produkte untereinander anhand ihres Beitrages zur Circular Economy unterscheidbar machen. Virtual feedstocks sind quasi die Königsdisziplin, um die Circular Economy mit Digitalisierungstechnologien über den ganzen Lebenszyklus zu verknüpfen. Diese Forschung muss auch Indikatoren zur Messung der Zirkularität von Materialien und Produkten, Unternehmen oder ganzer Branchen bereitstellen.

Ein großes Problem komplexer Produkte besteht darin, dass sie kaum in ihre einzelnen konstruktiven und stofflichen Komponenten auftrennbar sind. Einmal assembliert, lässt sich das entstandene Produktsystem nicht mehr erweitern, defekte Teile lassen sich nicht einfach austauschen und am Ende des Lebenszyklus bleibt nur das Zerkleinern und anschließende – grobe – Sortieren und Klassieren. Als Lösung hierfür wird in der Produktentwicklung im Allgemeinen die Modularisierung von Funktionen angesehen, wobei die Module durch einfache – und damit einfach zu trennende – Schnittstellen miteinander verbunden sind. Solche Konzepte fördern Reparierbarkeit und Langlebigkeit genauso wie Recyclingfähigkeit. Diese Modularität steht aber zum Teil der fortschreitenden Miniaturisierung und den mit ihr verbundenen Effizienz- und Performancegewinnen entgegen. Dabei werden immer mehr Funktionen auf immer kleinerem Raum realisiert. Während es uns also heute bereits gelingt, werkzeugfrei Produkte auf der Nanoskala zu gestalten, muss für die entgegengesetzte Desintegration in die Einzelbestandteile eine Wissensbasis erst noch geschaffen werden.

Die Transformation zu einer Circular Economy setzt demzufolge auf Kooperation, Transparenz und gemeinsamen Kompetenzgewinn (zirkuläre Wertschöpfung). Diese Prinzipien sind für einzelne Akteure in einer wettbewerbsorientierten Marktwirtschaft schwer zu akzeptieren oder umzusetzen. Wenn diese Akteure allerdings an einer gemeinsamen Wertschöpfung arbeiten – moderiert durch neutrale Stellen – kann die Circular Economy zu einem Innovationsmotor werden – für die EU, für Deutschland und für Nordrhein-Westfalen.

9.8 Die Circular Economy – eine Zukunftsoption für Nordrhein-Westfalen?

Die 2013 von McKinsey veröffentlichte Studie »NRW 2020 | Unser Land – unsere Zukunft« kam zu dem Ergebnis [McKinsey-2013], dass sich durch die Umsetzung einer Circular Economy mit Recyclinganlagen (vor allem Elektronikschrott) und Dienstleistungen eine zusätzliche Wertschöpfung von 3,4 Milliarden € realisieren ließe. Dies entspricht nach Ansicht der Autoren einem Nettozuwachs von 35 000 Arbeitsplätzen. Die Studie begründet dies u. a. so: *»Die Circular Economy versucht, eingesetzte Rohstoffe über den Lebenszyklus einer Ware hinaus durch Wiederverwenden, Wiederaufbereiten und Recycling im Wirtschaftskreislauf zu halten.« [...] »Von 100 EUR Reparaturkosten etwa für ein Mobiltelefon bleibt mehr Wertschöpfung im Land als von 100 EUR Verkaufswert eines Neugeräts, da die meisten Komponenten eines Produkts nicht lokal hergestellt, sondern importiert werden.«*

Ob diese Prognose so eintreffen kann, bliebe abzuwarten. In NRW sind 24 % der Beschäftigten (2 Millionen) im produzierenden Gewerbe tätig, welches insgesamt für das Land und das Wirtschaftswachstum vor Ort eine überragende Bedeutung hat. NRW deckt nahezu die gesamte Wertschöpfungskette für eine Circular Economy ab (Primärproduzenten, Grundstoffindustrie, Produzenten, Entsorgungsunternehmen) und hat nicht nur eine der dichtesten Forschungslandschaften Deutschlands, sondern auch sehr viele fachlich passfähige Lehrstühle und Institute für die Circular Economy. Trotzdem kann NRW in seiner Wachstumsdynamik nicht dem bundesdeutschen Trend folgen [RWI-2016]. Die hierfür diskutierten Gründe können und sollen hier nicht näher beleuchtet werden. Circular Economy, Recycling, Schließung von Stoffkreisläufen, Forschung und Entwicklung für Plattformchemikalien, Elektrochemie sind aber Bereiche, denen Wachstum zugetraut wird und in die auch im Vorlauf investiert werden sollte, wie aktuelle Untersuchungen aufzeigen [Enquete-2015b], [MWEIMH-2016].

Dazu wird es erforderlich sein, dass NRW seine in vielen Jahrzehnten gewachsenen Kompetenzen bei der Verarbeitung »großer Stoffströme« (»Kohle und Stahl«) auch auf kleinere und vielfältigere Stoffströme ausweitet. Dazu wird es auch darauf ankommen, die Circular Economy auf Basis moderner Digitalisierungstechnologien (»Industrie 4.0«, vgl. Kasten) aufzubauen, welche in NRW ebenfalls auf hohem Niveau entwickelt werden. Die Digitalisierung des Lebenszyklus von Produkten ist ein ambitioniertes Feld für Schnittstelleninnovationen und kann ein Kompetenz- und Wachstumsfeld für NRW werden, um die Sammlung und Aufbereitung sortenreiner Stoffströme zu optimieren. Hierzu könnte die oben vorgeschlagene Innovationsplattform »Nachhaltige Rohstoffwirtschaft und Produktentwicklung« wichtige Impulse liefern.

Zukunftsbetrachtungen und Innovationspotenzial: Industrie 4.0 – Rohstoffwende [BMW-2015]

Das Industrie-4.0-Konzept, d. h. die hochgradig vernetzte Echtzeit-Kommunikation zwischen Maschinen, kann auch in der Entsorgungswirtschaft Innovationsprozesse auslösen, mit denen es gelingt, mehr Technologiemetalle zu detektieren und sie in den Kreislauf zurückzuführen. In der Broschüre zur BMBF-Hightech-Strategie Zukunftsbild »Industrie 4.0« wird die Entsorgungswirtschaft der Zukunft wie folgt charakterisiert [BMBF-2013]: *»Auf Basis der digitalen Produktgedächtnisse hat sich ein lukratives Ge-*

schäft im Recycling entwickelt. Selbst komplizierte technische Geräte, wie Smartphones oder Computer, werden im Jahr 2025 zu geringen Kosten in ihre Komponenten zerlegt und entsorgt. Technologisch komplexe Verwertungsverfahren erlauben es, Wertstoffkreisläufe zu schließen und zu optimieren. Die damit verbundene Kostensenkung ist betriebswirtschaftlich effizient und zugleich ein wirksamer Beitrag zur sorgsamsten Ressourcennutzung.»

Eine im Bauteil gespeicherte Information über Inhaltsstoffe und deren Recyclingmöglichkeiten würde Recyclingmöglichkeiten deutlich verbessern, allerdings müssten für diese (Forschungs-)Vision die Hersteller einzelner Bauteile bezüglich ihrer Produktverantwortung und eines recyclinggerechten Designs voraussichtlich höhere Aufwendungen³⁴ auf sich nehmen. Wie eine kostengünstige, bauteilintegrierte Informationsbereitstellung aussehen kann, ist nicht beschrieben – und stellt auch eine noch kaum bearbeitete Forschungsfrage dar.

Die integrierte Technologie-Roadmap 2025+ für Automation betrachtet die Thematik »Nachhaltige Rohstoffversorgung« und »Recycling als Rohstoffquelle« aus Sicht weiterer Zukunftsmärkte für die Automationsbranche [ZVEI-2016]. Die Autoren sehen dabei die Vernetzung von autonomen, sich situativ selbst steuernden, selbst konfigurierenden, wissensbasierten, sensorgestützten und räumlich verteilten Demontage-, Sortier- und Aufbereitungsprozessen zur Rückgewinnung von Wertstoffen im Vordergrund. Als Haupttreiber für die Entwicklung der Recyclingwirtschaft wird die Abfall- und Umweltpolitik erkannt, als Innovationshemmnis die volatilen Preise der Rohstoffmärkte. Neue Potenziale werden in den bisher nicht kommerziell zur Verfügung stehenden Verfahren zur Rückgewinnung von Technologiemetallen und große Potenziale in der Weiterentwicklung der Demontage komplexer Produkte gesehen.

Im ersten Policy Paper »Deutschland 2049 – Auf dem Weg zu einer nachhaltigen Rohstoffwirtschaft« stellt das Öko-Institut sein Projekt, in dem eine umfassende Strategie zur Rohstoffwende erarbeitet werden soll, vor. In einem Ausblick über die Instrumente für eine Rohstoffwende werden für die Nachfrageseite auch die Themen Substitution, Lebensdauerverlängerung und Recycling erwähnt. Unter die Steuerungsansätze fallen u. a. Informationen (z. B. Produktdeklarationen), freiwillige Vereinbarungen und Selbstverpflichtungen, ordnungsrechtliche Standards, Preis- sowie Mengensteuerungen. Als ein rohstoffspezifisches Ziel wird auch hier die Steigerung der EoL-Recyclingrate, z. B. für Neodym, gesehen. Weitere Anforderungen an das Produktdesign sowie Instrumente der Kennzeichnung wären zur Förderung des Recyclings denkbar [Buchert-2016].

Das Industrie-4.0-Konzept bietet somit für das Recycling erhebliche Möglichkeiten, heutige Hemmnisse (wie z. B. die Wissenslücke zu verbauten Massen) zu überwinden. Industrie 4.0 (im internationalen Bereich eher »smart factory« oder »smart manufacturing« genannt) erobert sich in der Stückgutfertigung gerade erste Anwendungen (als Fortschreibung der Automatisierungstechnik). Die Umsetzung des Konzepts in der Entsorgungswirtschaft ist dagegen nicht weit fortgeschritten, hier besteht noch erheblicher Forschungsbedarf, aber mittel- bis langfristig bieten sich auch Chancen auf marktkompatible Innovationen »Made in Germany«.

Digitalisierung ist jedoch nur eine von mehreren Zukunftstechnologien (wenn auch derzeit diejenige mit der größten öffentlichen Wahrnehmung), die Beiträge zu einer Circular Economy liefern können. Die Analyse der Potenziale aktuell diskutierter Zukunftstechnologien³⁵ [VDI-2015], um eine Circular Economy zu etablieren, ist ein vielversprechender Ansatz, Hightech- mit Lowtech-Lösungen in NRW zu verbinden. Diese Analyse konkreter Technologien und ihrer (regional-)wirtschaftlichen Wirkungen würde den systemanalytischen Ansatz dieser Studie richtungsweisend ergänzen.

³⁴ Und zwar weniger für die technische Umsetzung der Informationsbereitstellung als vielmehr für die qualitätsgesicherte Beschaffung der Daten zur stofflichen Zusammensetzung.

³⁵ Wie z. B. Nanotechnik, Photonik, Werkstoffwissenschaft [VDI-2015]

Aus diesen Analysen wäre es dann ein möglicher Schritt, für NRW eine »Circular-Economy-Strategie« zu entwickeln und perspektivisch mit der Innovationsstrategie und dem Klimaschutzplan des Landes so abzustimmen, dass daraus synergetisch wirkende, ökonomisch sinnvolle Innovationsprojekte entstehen können. Hierdurch könnte NRW in Bezug auf nachhaltige Entwicklung eine Vorreiterrolle nicht nur in Deutschland, sondern auch in Europa übernehmen.

10 Anhänge

10.1 Positionen der Stakeholder zum Kreislaufwirtschaftspaket (Stand September 2016)

Die Legislativvorschläge aus dem Kreislaufwirtschaftspaket der Europäischen Kommission haben sowohl bei den Regierungen verschiedener europäischer Länder, bei Verbänden des verarbeitenden und produzierenden Gewerbes als auch im Bereich der Abfallentsorgung sowie bei Umweltverbänden umfangreiche Reaktionen hervorgerufen. Naturgemäß variieren die Interessenslagen und Einschätzungen der jeweiligen Stakeholder erheblich. Um hier einen kurzen Überblick über die Standpunkte der jeweiligen Interessengruppen geben zu können, wurden relevante Positionspapiere und Stellungnahmen gescreent. Dabei wurde überprüft, welche Kritikpunkte an den im Kapitel 8.2 beschriebenen Legislativvorschlägen bestehen und in welchen Bereichen angestrebte Maßnahmen befürwortet werden. Für einen ersten Überblick wurden in der nachfolgend dargestellten Tabelle die grundsätzlichen Einschätzungen der Stakeholder hinsichtlich der wichtigsten übergeordneten Legislativvorschläge (vgl. Kapitel 8.2) gegenübergestellt.

Tabelle 10-1: Übersicht der Stakeholder-Positionen zu den in Kapitel 3.3 beschriebenen Legislativvorschlägen [ZVEI-2016], [DIHK-2016], [WVMetalle-2016], [ZDH-2016], [VCI-2015], [BDE-2016], [VKU-2016], [ITAD-2015], [bvse-2015], [DUH-2016], [NABU-2015], [BMUB-2016a; BMUB-2016a], [EWSA-2016], [EEB-2016], [FEAD-2016], [FOEE-2015]

		Positionen zu:											
		Zielvor- gaben Deponie- rung	Zielvorga- ben Bau- und Ab- bruchab- fälle	Zielvorga- ben Sied- lungsabfäl- le	Zielvorga- ben Ver- packungs- abfälle	Berech- nungsvor- gaben, Recycling- quoten	Umset- zungs- fristen	Qualitäts- standards für Sekun- därrohstof- fe	Harmoni- sierung Zusam- menspiel zw. Stoff, Produkt und Abfall	Reduzie- rung von gefährli- chen Zusätzen	Auswei- tung Öko- Design- richtlinie	Produkt- kenn- zeichnung	Erweiter- te Her- stellerver- liver- antwortung
Deutschland	Verbände des produzierenden und verarbeitenden Gewerbes												
	ZVEI ³⁶	+	o	o	o	o	o	o	+	o	-	o	+
	DIHK ³⁷	+	+	o	-	o	o	+	+	o	-	o	o
	WV Metal- le ³⁸	+	o	+	o	o	o	+	o	+	+	o	+
	ZDH ³⁹	+	-	o	+	o	o	o	o	o	o	o	o
	VCI ⁴⁰	+	o	o	o	o	o	o	o	o	+	o	o
	Verbände der Verwertungs- und Entsorgungsindustrie												
	BDE ⁴¹	+	o	+	+	o	o	o	o	o	o	o	o
	VKU ⁴²	+	o	+	o	o	o	o	o	o	+	o	+

³⁶ ZVEI: Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie

³⁷ DIHK: Deutscher Industrie- und Handelskammertag

³⁸ WV Metalle: Wirtschaftsvereinigung Metalle

³⁹ ZDH: Zentralverband des deutschen Handwerks

⁴⁰ VCI: Verband der chemischen Industrie e.V.

⁴¹ BDE: Bundesverband der Deutschen Entsorgungs-, Wasser- und Rohstoffwirtschaft e.V.

⁴² VKU: Verband kommunaler Unternehmen

	Positionen zu:												
	Zielvor- gaben Deponie- rung	Zielvorga- ben Bau- und Ab- bruchab- fälle	Zielvorga- ben Sied- lungsabfäl- le	Zielvorga- ben Ver- packungs- abfälle	Berech- nungsvor- gaben, Recycling- quoten	Umset- zungs- fristen	Qualitäts- standards für Sekun- därrohstof- fe	Harmoni- sierung Zusam- menspiel zw. Stoff, Produkt und Abfall	Reduzie- rung von gefährli- chen Zusätzen	Auswei- tung Öko- Design- richtlinie	Produkt- kenn- zeichnung	Erweiter- te Her- stellerver- liverantwor- tung	
	ITAD ⁴³	-	o	o	o	o	+	o	+	o	o	o	
	bvse ⁴⁴	-	o	o	o	o	-	o	o	o	o	o	
	Umweltverbände												
	DUH ⁴⁵	+	o	-	-	-	o	+	o	o	+	o	o
	NABU ⁴⁶	-	o	-	-	o	o	o	o	o	-	o	o
	Regierungseinrichtungen												
	Regierung der BRD	-	-	+	-	-	o	o	-	o	o	o	-
	Verbände der Verwertungs- und Entsorgungsindustrie												
	FEAD ⁴⁷	+	o	+	+	-	o	+	o	o	+	o	o
	Umweltverbände												
	FOEE ⁴⁸	-	o	-	-	o	-	o	o	o	o	o	o
Regierungseinrichtungen													

⁴³ ITAD: Interessengemeinschaft der Thermischen Abfallbehandlungsanlagen in Deutschland e.V.

⁴⁴ bvse: Bundesverband Sekundärrohstoffe und Entsorgung e.V.

⁴⁵ DUH: Deutsche Umwelthilfe

⁴⁶ NABU: Naturschutzbund Deutschland e.V.

⁴⁷ FEAD: Europäische Föderation der Entsorgungswirtschaft

⁴⁸ FOEE: Friends of the Earth Europe

	Positionen zu:											
	Zielvorgaben Deponierung	Zielvorgaben Bau- und Abbruchabfälle	Zielvorgaben Siedlungsabfälle	Zielvorgaben Verpackungsabfälle	Berechnungsvorgaben, Recyclingquoten	Umsetzungsfristen	Qualitätsstandards für Sekundärrohstoffe	Harmonisierung Zusammenspiel zw. Stoff, Produkt und Abfall	Reduzierung von gefährlichen Zusätzen	Ausweitung Öko-Designrichtlinie	Produktkennzeichnung	Erweiterte Herstellerverantwortung
Europ. Wirtschafts- und Sozialausschuss	+	-	-	-	+	-	o	o	o	+	+	+
EEB ⁴⁹	+	o	-	-	-	o	o	o	o	+	o	+

- _ Legislativvorschlag wird negativ bewertet
- + Legislativvorschlag wird positiv bewertet
- o Legislativvorschlag wurde in der Stellungnahme nicht berücksichtigt

⁴⁹ EEB: European Environmental Bureau

Neben den die Legislativvorschläge betreffenden Positionen umfasste ein Teil der Stellungnahmen weitere grundsätzliche Aspekte, die nachfolgend kurz dargestellt werden.

Für einige Stakeholder erscheint es nicht sinnvoll, im Bereich der Abfallwirtschaft die Ziele weiter anzuheben, solange ein Großteil der Mitgliedsstaaten die bisher festgesetzten Ziele noch deutlich verfehlt. Diese Meinung äußert unter anderem der österreichische Landtag bezugnehmend auf den zurückgenommenen Entwurf des Kreislaufwirtschaftspaketes [Pomberger-2015]. Nach Einschätzungen des österreichischen Landtages müsste deswegen das vorrangige Ziel eine vollständige Umsetzung und Erfüllung der bisher geltenden Regelungen sein. Ähnlich äußert sich der Deutsche Industrie- und Handelskammertag (DIHK) in seiner Stellungnahme [DIHK-2016], die generell einer ordnungsgemäße Umsetzung des bestehenden europäischen EU-Kreislaufwirtschaftsrechts Vorrang vor neuen ehrgeizigen Maßnahmen einräumt.

Der Zentralverband der Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e.V weist in seiner Stellungnahme darauf hin, dass eine mögliche Nutzung der Methode des Product Environmental Footprint sorgfältig zu prüfen wäre, da mit der Ökodesign-Rahmenrichtlinie sowie der Energieverbrauchskennzeichnung bereits ausreichende EU-weite Regulierungs- und Kennzeichnungssysteme bestünden.

Insbesondere Umweltverbände kritisieren in den aktuellen Legislativvorschlägen, dass die Reduzierung von Lebensmittelabfällen unberücksichtigt bleibt [NABU-2015], [FOEE-2015], [EEB-2016], dass keine konkreten Ressourceneffizienzziele definiert werden und somit keine konkreten Maßgaben zur Verringerung des Ressourcenverbrauchs genannt wurden [EEB-2016], [DUH-2016], [FOEE-2015].

Darüber hinaus wird insbesondere von Seiten der Wirtschaft befürchtet, dass durch die Legislativvorschläge zusätzliche Kosten und ein höherer Verwaltungsaufwand entstehen könnten [ZVEI-2016], [DIHK-2016], [BMUB-2016a] und dass durch die Bereitstellung umfassender Informationen zu Gehalten kritischer Rohstoffe in Geräten unternehmensinterne Daten preisgegeben werden müssten.

Generell wird befürchtet, dass eine Ausweitung der Befugnisse der EU-Kommission die Mitwirkungsmöglichkeit der betroffenen Wirtschaft einschränken könnten [ZDH-2016] und die angestrebte Produktpolitik den Raum für die innovative Freiheit zum Design komplexer und zugleich nachhaltiger Produkte unverhältnismäßig beschränken könnte [ZVEI-2016].

Des Weiteren bemängelt die Europäische Föderation der Entsorgungswirtschaft FEAD, dass Gewerbeabfälle in den aktuellen Legislativvorschlägen unberücksichtigt bleiben [FEAD-2016].

10.2 Anforderungen CE-Kennzeichnung für Computerbildschirme

Tabelle 10-2: Übersicht über die durch die CE-Kennzeichnung abgedeckten gesetzlichen Anforderungen an Computer-Bildschirme

Relevanter Bereich	Ordnungspolitische Regelungen	Normen, Standards, marktübliche Anforderungen
Gerätesicherheit	EU Niederspannungsrichtlinie 2006/95/EG Erste Verordnung zum Gesetz über die Bereitstellung von Produkten auf dem Markt (Produktsicherheitsgesetz – ProdSG)	EN 60950-1 (Sicherheit von Einrichtungen der Informationstechnik) oder alternativ: EN 62368-1 (Sicherheit von Einrichtungen für Audio/Video, Informations- und Kommunikationstechnik) EN 62479 oder EN 62311 (Sicherheit in elektromagnetischen Feldern)
Elektromagnetische Verträglichkeit	EU EMV-Richtlinie 2004/108/EG Gesetz über die elektromagnetische Verträglichkeit von Geräten (EMV-Gesetz)	EN 55022 (Klasse A oder B Grenzwerte und Messverfahren) alternativ EN 55032 (Elektromagnetische Verträglichkeit von Multimediageräten und -einrichtungen – Anforderungen an die Störaussendung) EN 55024 (Grenzwerte und Messverfahren) EN 61000-3-2 (Grenzwerte für Oberschwingungsströme) EN 61000-3-3 (Grenzwerte für Spannungsschwankungen)
Umwelt	EU ErP-Richtlinie 2009/125/EG, umgesetzt durch Gesetz über die umweltgerechte Gestaltung energiebetriebener Produkte (EBPG) EU RoHS-2 Richtlinie 2011/65/EU, umgesetzt durch Verordnung zur Beschränkung der Verwendung bestimmter gefährlicher Stoffe in Elektro- und Elektronikgeräten (Elektro- und Elektronikgeräte-Stoff-Verordnung – Elektro-StoffV) EN 50581:2012 Technische Dokumentation zur Beurteilung von Elektro- und Elektronikgeräten hinsichtlich der Beschränkung gefährlicher Stoffe Verordnung (EG) No. 1275/2008 – nur für IT-Geräte der EMV EN55022 Klasse B (siehe 2.2) (Stromverbrauch Haushalts- und Bürogeräte im Bereitschafts- und Aus-Zustand)	EPEAT Blauer Engel Nordic Swan TCO

Relevanter Bereich	Ordnungspolitische Regelungen	Normen, Standards, marktübliche Anforderungen
	EN 50564:2011 Elektrische und elektronische Haushalts- und Bürogeräte – Messung niedriger Leistungsaufnahmen Verordnung (EG) Nr. 278/2009 (Leistungsaufnahme externer Netzteile) EN 50563:2011 Externe AC/DC- und AC/AC-Netzteile – Bestimmung von Nulllast und durchschnittlicher Effizienz im Betrieb Verordnung (EG) Nr. 617/2013 (Umweltgerechte Gestaltung von Computern und Computerservern)	

11 Glossar

Tabelle 11-1: Definition der Begrifflichkeiten für die vorliegende Studie

Begriff in Deutsch mit engl. Übersetzung in Klammern	Definition (Deutsch)	Definition (Englisch)
Abfallrahmenrichtlinie 2008/98/EG (Waste Framework Directive 2008/98/EC)	Richtlinie der Europäischen Gemeinschaft, die den rechtlichen Rahmen für die Abfallgesetzgebung der Mitgliedstaaten setzt. Mit der Richtlinie sollen »die schädlichen Auswirkungen der Erzeugung und Bewirtschaftung von Abfällen vermieden oder verringert, die Gesamtauswirkungen der Ressourcennutzung reduziert und die Effizienz der Ressourcennutzung verbessert werden« [EC-2008a].	European Directive creating the legal framework for waste legislation in the member states. »The directive lays down measures to protect the environment and human health by preventing or reducing the adverse impacts of the generation and management of waste and by reducing overall impacts of resource use and improving the efficiency of such use.« [EC-2008b].
Altreifen (used tyres)	Gebrauchtreifen, die in Deutschland nicht mehr für den Einsatz im Straßenverkehr zugelassen sind, weil die Mindestprofiltiefe bei Pkw im mittleren Bereich der Lauffläche von 1,6 mm (§ 36 Abs. 2 Satz 4 StVZO) unterschritten oder der Reifen beschädigt bzw. versprödet ist (älter als 10 Jahre). Diese Profiltiefe gilt auch für die EU-Staaten (s. EU-Richtlinie 89/459/EWG) [BLU-2013].	Used tyres which have no permission for usage in road transport anymore. This permission expires in Germany when the minimum tread depth (passenger car) in the middle area of the tread is lower than 1,6 mm or the tyre is damaged or embrittled (older than 10 years). The minimum tread depth is binding for all EU-member states (acc. to 89/459/EWG) (acc. to [BLU-2013].
Behandlung und Entsorgung von Abfällen (waste treatment)	Verwertungs- und Beseitigungsverfahren, einschließlich der Vorbereitung vor der Verwertung oder Beseitigung (§3, Abs. 22, [KrWG-2012] und §3 Nr. 14 [EC-2008a]).	Recovery or disposal operations, including preparation prior to recovery or disposal (Art. 3, No. 14 [EC-2008a]).
Beseitigung von Abfällen (waste disposal)	Verfahren, das kein Verwertungsverfahren ist, auch wenn das Verfahren zur Nebenfolge hat, dass Stoffe oder Energie zurückgewonnen werden (Art. 3, Nr. 19, [EC-2008a]. In Anlage 1 der [EC-2008a] werden ausgewählte Beseitigungsverfahren aufgeführt.	Any operation which is not recovery even where the operation has as a secondary consequence the reclamation of substances or energy (Art. 3, No. 19 [EC-2008b]). In Annex I of [EC-2008b] a non-exhaustive list of disposal operations can be found.

Begriff in Deutsch mit engl. Übersetzung in Klammern	Definition (Deutsch)	Definition (Englisch)
Besonders besorgniserregende Stoffe (substances of very high concern, SVHC)	Bestimmte Stoffe, die sehr ernste und häufig irreversible Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit und die Umwelt haben können (s. die ausführliche Definition und die Liste der Stoffe in der europäischen EU-Direktive, Artikel 57-59 und Anhang) [EP ER-2006; EP ER-2008].	Substances that may have serious and often irreversible effects on human health and the environment can be identified as substances of very high concern (SVHCs). More detailed information and the list of SVHCs is given in the European REACH legislation (Articles 57-59 and the Annexes) [EP ER-2016].
Circular Economy	In dieser Studie wurde das Konzept der Circular Economy in Kapitel 4.2 definiert.	In this study the concept of the Circular Economy is defined in chapter 4.2.
CLP-Verordnung (CLP regulation)	Verordnung (EG) 1272/2008 über die Einstufung, Kennzeichnung und Verpackung von Stoffen und Gemischen [EC-2008].	Regulation (EC) No 1272/2008 on classification, labelling and packaging of substances and mixtures [EC-2016].
Dekarbonisierung (decarbonization)	Strategie zur Reduzierung der Kohlenstoffintensität in einer Volkswirtschaft bis hin zur nahezu vollkommenen Treibhausgasneutralität (letztlich, um den Ausstoß von kohlenstoffhaltigen Treibhausgasen massiv zu verringern). Mögliche Maßnahmen dazu: Energieeffizienz, Substitution kohlenstoffhaltiger Energieträger durch kohlenstofffreie (erneuerbare Energien) oder kohlenstoffverminderte Energieträger, Carbon Capture and Storage (CCS)/Carbon Capture and Utilization (CCU), Elektrifizierung mit Strom aus erneuerbaren Quellen, Einsatz von Biomasse, Kohlenstoffkreisläufe, Wasserstoffwirtschaft [UBA-2014], [WupperInst-2015].	
Dissipativer Verlust (dissipative loss)	Unter dissipativen Verlusten werden alle Materialien zusammengefasst, die eine indirekte Folge von Produktions- und Konsumaktivitäten sind und an die Umwelt abgegeben werden [Destatis-2017].	Dissipative losses are defined as all materials, which occur as an indirect consequence of production and consumption activities and which are released into the environment.

Begriff in Deutsch mit engl. Übersetzung in Klammern	Definition (Deutsch)	Definition (Englisch)
Downcycling	Mit dem Begriff wird die Gewinnung eines Produktes aus Abfall bezeichnet, welches gegenüber dem ursprünglichen Produkt eine geringere Qualität und Funktionalität aufweist (nach [UNEP-2011]).	Downcycling means converting waste into a new product of lesser quality and reduced functionality [UNEP-2011].
End-of-Life (EoL)	End-of-Life bezeichnet die Endphase des Produktlebenszyklus, in der das Produkt zum Abfall wird und entsorgt oder verwertet werden muss.	End-of Life refers to the final phase of the product lifecycle, in which the product becomes waste and must be disposed of or recycled.
Ende der Abfalleigenschaft (end-of-waste status)	Bestimmte festgelegte Abfälle sind nicht mehr als Abfälle [...] anzusehen, wenn sie ein Verwertungsverfahren, wozu auch ein Recyclingverfahren zu rechnen ist, durchlaufen haben und spezifische Kriterien erfüllen, die gemäß den folgenden Bedingungen festzulegen sind: Der Stoff oder Gegenstand wird gemeinhin für bestimmte Zwecke verwendet; es besteht ein Markt für diesen Stoff oder Gegenstand oder eine Nachfrage danach; der Stoff oder Gegenstand erfüllt die technischen Anforderungen für die bestimmten Zwecke und genügt den bestehenden Rechtsvorschriften und Normen für Erzeugnisse und die Verwendung des Stoffs oder Gegenstands führt insgesamt nicht zu schädlichen Umwelt- oder Gesundheitsfolgen (Art. 6 Abs. 1, [EC-2008a]).	Certain specified waste shall cease to be waste [...] when it has undergone a recovery, including recycling, operation and complies with specific criteria to be developed in accordance with the following conditions: the substance or object is commonly used for specific purposes; a market or demand exists for such a substance or object; the substance or object fulfils the technical requirements for the specific purposes and meets the existing legislation and standards applicable to products; and the use of the substance or object will not lead to overall adverse environmental or human health impacts (Art. 6, No. 1, [EC-2008b]).
Energetische Verwertung (energy recovery)	Hauptverwendung eines Abfalls als Brennstoff oder als anderes Mittel der Energieerzeugung (Anhang II, R1 [EC-2008a]). Dies gilt für Verbrennungsanlagen, deren Zweck die Behandlung fester Siedlungsabfälle ist, nur dann, wenn die unter Anhang II, Fußnote (*) aufgeführten Ener-	Usage of a waste principally as a fuel or other means to generate energy (Anhang II, R1[EC-2008b]). Incineration facilities dedicated to the processing of municipal solid waste are included only with an energy efficiency not below the value specified in footnote (*), Annex II.

Begriff in Deutsch mit engl. Übersetzung in Klammern	Definition (Deutsch)	Definition (Englisch)
	gieeffizienzriterien nicht unterschritten werden.	
Erweiterte Produktverantwortung (extended producer responsibility)	Ein umweltpolitischer Ansatz, in dem die Verantwortung des Produzenten für ein Produkt auf die Nachnutzungsphase ausgeweitet wird (nach [OECD-2001]).	An environmental policy approach in which a producer's responsibility for a product is extended to the post-consumer stage of a product's life cycle [OECD-2001].
Heizwertklausel (clause on calorific value)	Der Paragraph im Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG), der besagt, dass die energetische Verwertung einer stofflichen Verwertung gleichrangig ist, wenn der Heizwert des Abfalls mindestens 11 000 Kilojoule pro Kilogramm beträgt und für den Abfallstrom keine Spezialregelung existiert (s. § 8, Abschnitt 3 des KrWG, [KrWG-2012]).	Paragraph of the German Law on Closed Cycle Management, stating that energy recovery is to be equal in ranking to material recovery if the calorific value of the individual waste is at least 11,000 kilojoules per kilogramme (acc. to [KrWG-2012]).
Kritische Emissionen (critical emissions)	In dieser Studie zählen zu kritischen Emissionen auch die beim Recycling anfallende Menge zu beseitigender Materialien (Störstoffe, Anhaftungen, nicht-trennbare Reste etc.).	In the present study: critical emissions also include the amount of materials to be disposed of during recycling (impurities, adhesions, non-separable residues etc.).
Kritische Rohstoffe (critical raw materials)	Siehe Kapitel 8.2.6: Kritischen Rohstoffen wird von der Europäischen Kommission eine große wirtschaftliche Bedeutung beigemessen.	See Chapter 8.2.6: Critical raw materials are of great economic importance to the European Commission.
Langlebigkeit (durability)	Die Fähigkeit eines Produktes [...], dank seiner Konstruktion als Langzeitgut und/oder der Wartung und Instandhaltung, die ihm zuteilwird, nutzungsbezogene Funktionen über lange Zeiträume wirtschaftlich zu erfüllen [Stahel-1991].	The product's ability to fulfil its use-related function over a long period of time and in an economically efficient way due to its construction and due to maintenance (acc. to [Stahel-1991]).
Nachhaltige Produktion und nachhaltiger Verbrauch (sustainable consumption and production, SCP)	Ein übergeordnetes Ziel der und eine essenzielle Voraussetzung für eine nachhaltige Entwicklung. Diesem Prinzip entsprechend sollen Dienstleistungen und Produkte die Grundbedürfnisse befriedigen und die Le-	An overarching objective of and an essential requirement for sustainable development. Among the principles of this objective are the use of services and related products, which respond to basic needs and bring

Begriff in Deutsch mit engl. Übersetzung in Klammern	Definition (Deutsch)	Definition (Englisch)
	Lebensqualität verbessern und gleichzeitig mit einem möglichst geringen Verbrauch natürlicher Ressourcen sowie möglichst geringen Abfallmengen und Schadstoffemissionen im gesamten Lebenszyklus verbunden sein, um die Erfüllung der Bedürfnisse zukünftiger Generationen nicht zu gefährden (dt. nach [UNEP-2012]).	a better quality of life while minimizing the use of natural resources and toxic materials as well as the emissions of waste and pollutants over the life cycle of the service or product so as not to jeopardize the needs of future generations [UNEP-2012].
Recycled Content	Siehe Recyclinganteil.	See »Recyclinganteil (recycled content)«.
Recycling (recycling)	Jedes Verwertungsverfahren, durch das Abfallmaterialien zu Erzeugnissen, Materialien oder Stoffen entweder für den ursprünglichen Zweck oder für andere Zwecke aufbereitet werden. Es schließt die Aufbereitung organischer Materialien ein, aber nicht die energetische Verwertung und die Aufbereitung zu Materialien, die für die Verwendung als Brennstoff oder zur Verfüllung bestimmt sind [EC-2008a].	Any recovery operation by which waste materials are reprocessed into products, materials or substances whether for the original or other purposes. It includes the reprocessing of organic material but does not include energy recovery and the reprocessing into materials that are to be used as fuels or for backfilling operations [EC-2008b].
Recyclinganteil (recycled content)	Anteil eines recycelten Stoffs am insgesamt produzierten Stoff.	Percentage of recycled substances in the finished product.
Recyclingfähigkeit (recyclability)	Eignung von Komponenten und oder Materialien, von einem Abfallstrom abgetrennt und recycelt werden zu können (dt. nach [ISO-22628]).	Ability of component parts, materials or both that can be diverted from an end-of-life stream to be recycled [ISO-22628].
Recyclingquote (recycling quota)	Siehe Recyclingrate.	See »Recyclingrate (recycling rate)«.
Recyclingrate (recycling rate)	Menge eines dem Recycling zugeführten Stoffes an der Menge des als Abfall insgesamt verfügbaren Stoffes.	Quantity of a collected substance divided by the quantity of the total available substance.
Repowering	Siehe Kapitel 6.1: Mit dem Begriff des Repowering wird in der Windenergiebranche im Allgemeinen der Ersatz älterer Wind-	See Chapter 6.1: The concept of repowering generally stands for the replacement of older wind energy plants with new, more

Begriff in Deutsch mit engl. Übersetzung in Klammern	Definition (Deutsch)	Definition (Englisch)
	energieanlagen durch neue, effizientere Anlagen definiert [BWE-2012].	efficient plants [BWE-2012].
Reserve	Nachgewiesene, zu heutigen Preisen und mit heutiger Technik wirtschaftlich gewinnbare (Energie-)Rohstoffmengen [BGR-2010].	Proven (energy) raw material quantities which can be economically exploited at current prices and with today's technologies.
Ressource (resource)	Nachgewiesene, aber derzeit technisch und/oder wirtschaftlich nicht gewinnbare sowie nicht nachgewiesene, aber geologisch mögliche, künftig gewinnbare (Energie-)Rohstoffmengen [BGR-2010].	Proven but currently technically and/or economically not exploitable (energy) raw material quantities as well as not proven, but geologically possible, potentially exploitable (energy) raw material quantities.
Ressourceneffizienz (resource efficiency)	Das Verhältnis eines bestimmten Nutzens oder Ergebnisses zum dafür nötigen Ressourceneinsatz [VDI-4800].	The ratio between a certain benefit or result and the necessary resource input to receive this benefit or result (acc. to [VDI-4800]).
Rohstoffliche Verwertung (feedstock recycling)	Bei der rohstofflichen Verwertung wird der Abfall chemisch aufgespalten und als Rohstoffersatz genutzt. Dies ist beispielsweise bei der Gewinnung von Synthesegas aus Altkunststoffen oder von Methanol aus organischen Abfällen der Fall (nach [LUBW-2016]).	In feedstock recycling, waste is chemically transformed to substitute primary raw materials. For example, recovery of synthesis gas from plastic waste or recovery of methanol from organic waste belongs to the feedstock recycling (acc. to [LUBW-2016]).
Schadstoff (pollutant, harmful substance)	Stoff, der bestimmte gefährliche Stoffeigenschaften hat. Als problematisch wurden folgende Eigenschaften definiert: karzinogen (krebserzeugend), mutagen (erbgutverändernd) oder reproduktionstoxisch (fortpflanzungsgefährdend) der Kategorie 1 bis 3, atemwegssensibilisierend, hautsensibilisierend, hormonell wirksam, PBT-Eigenschaften (persistent, bioakkumulierbar und toxisch), vPvB-Eigenschaften (sehr persistent und sehr bioakkumulierbar), die Einzeleigenschaften der Bioakkumulierbar-	Substance which has certain hazardous properties. The following properties can be identified as problematic: Carcinogenic, mutagenic (toxic to reproduction) or reproductive toxic (Category 1 to 3), respiratory sensitizing, skin sensitizing, hormonally effective, PBT (persistent, bioaccumulative and toxic), vPvB properties (very persistent and very bioaccumulative), interfering with the bioaccumulability and persistence in organic substances as well as substances classified as environmentally hazardous or

Begriff in Deutsch mit engl. Übersetzung in Klammern	Definition (Deutsch)	Definition (Englisch)
	keit und Persistenz bei organischen Stoffen sowie die Einstufung als umweltgefährlich mit dem R-Satz »Sehr giftig für Wasserorganismen, kann in Gewässern längerfristig schädliche Wirkung haben« [UBA-2011].	labeled with the risk phrase »Very toxic to aquatic organisms, may cause long-term adverse effects in the aquatic environment« [UBA-2011].
Sekundärrohstoff (secondary raw material)	Alle nicht gezielt produzierten Substanzen und Stoffe (Zwangs-, Kuppel- oder Nebenprodukte), die aus Abfall gewonnen und sinnvoll verwertet werden können [Bihl-2004].	All non-targeted substances and substances (coercive, coupling or by-products), which can be obtained from waste or recycled [Bihl-2004].
Technik (technology)	Die Menge der nutzenorientierten, künstlichen, gegenständlichen Gebilde (Artefakte oder Sachsysteme); die Menge menschlicher Handlungen und Einrichtungen, in denen Sachsysteme entstehen; die Menge menschlicher Handlungen, in denen Sachsysteme verwendet werden [VDI-3780].	The set of use-oriented, artificial, concrete objects (artefacts or object systems); the set of human actions and institutions in which object systems originate; the set of human activities in which object systems are utilised [VDI-3780].
Technology (technology)	Allgemeine Technikwissenschaft, die von den Prinzipien beliebiger technischer und sozio-technischer Systeme im ökonomischen, gesellschaftlichen und politischen Zusammenhang handelt [Meyer-2006].	General engineering science, which deals with the principles of arbitrary technical and socio-technical systems in the economic, social and political context [Meyer-2006].
Trade-off	Als »Trade-off« wird eine Situation in einem multikriteriellen Entscheidungsprozess bezeichnet, in der eine Verschlechterung in einem Kriterium erforderlich ist, um eine Verbesserung in einem anderen Kriterium zu erreichen (nach [Kaliszewski-2006]).	The trade-off in multiple criteria decision making means a losing in one outcome component (criterion) to gain the value of another [Kaliszewski-2006].
Umweltverträglichkeit (environmental compatibility)	Eine umweltverträgliche Herstellung und Nutzung [...] umfasst eine schonende Inanspruchnahme natürlicher Ressourcen, sowie die Erzeugung möglichst	»An environmentally compatible production and utilisation [...] comprises a sparing use of natural resources and the generation of low amounts of waste and

Begriff in Deutsch mit engl. Übersetzung in Klammern	Definition (Deutsch)	Definition (Englisch)
	geringer Abfall- und Reststoffströme unter Berücksichtigung der potenziellen Schadstoff-/ Umweltbelastungen über den gesamten Lebenszyklus [UBA-2016a].	residuals under consideration of the potential environmental pollution/impact over the whole life cycle« (acc. to [UBA-2016a]).
Vermeidung von Abfällen (waste prevention)	Jede Maßnahme, die ergriffen wird, bevor ein Stoff, Material oder Erzeugnis zu Abfall geworden ist, und dazu dient, die Abfallmenge, die schädlichen Auswirkungen des Abfalls auf Mensch und Umwelt oder den Gehalt an schädlichen Stoffen in Materialien und Erzeugnissen zu verringern (§3, Absatz 20 [KrWG-2012]).	Measures taken before a substance, material or product has become waste, that reduce the quantity of waste, including through the re-use of products or the extension of the life span of products; the adverse impacts of the generated waste on the environment and human health or the content of harmful substances in materials and products (§ 3, No. 20 [KrWG-2012]).
Verwertbarkeit (recoverability)	Eignung von Abfällen, stofflich, energetisch oder rohstofflich verwertet werden zu können.	Ability of waste to be recovered by recycling, energy recovery or feedstock recycling.
Verwertung von Abfällen (recovery)	Jedes Verfahren, als dessen Hauptergebnis Abfälle innerhalb der Anlage oder in der weiteren Wirtschaft einem sinnvollen Zweck zugeführt werden, indem sie andere Materialien ersetzen, die ansonsten zur Erfüllung einer bestimmte Funktion verwendet worden wären, oder die Abfälle so vorbereitet werden, dass sie diese Funktion erfüllen (Art. 3, Nr. 15 [EC-2008a]).	Any operation the principal result of which is waste serving a useful purpose by replacing other materials which would otherwise have been used to fulfil a particular function, or waste being prepared to fulfil that function, in the plant or in the wider economy (Art. 3, No. 15 [EC-2008a]).
Vorbereitung zur Wiederverwendung (preparing for re-use)	Verwertungsverfahren der Prüfung, Reinigung oder Reparatur, bei dem Erzeugnisse oder Bestandteile von Erzeugnissen, die zu Abfällen geworden sind, so vorbereitet werden, dass sie ohne weitere Vorbehandlung wieder für denselben Zweck verwendet werden können, für den sie ursprünglich bestimmt waren (§ 3, Absatz 24 [KrWG-2012]).	Preparing for re-use means checking, cleaning or repairing recovery operations, by which products or components of products that have become waste are prepared so that they can be re-used without any other pre-processing (Art. 3, No. 16 [EC-2008a]).

Begriff in Deutsch mit engl. Übersetzung in Klammern	Definition (Deutsch)	Definition (Englisch)
Werkstoffliche Verwertung (recycling)	Siehe »Recycling«.	See »Recycling«.
Wiederverwendung (re-use)	Jedes Verfahren, bei dem Erzeugnisse oder Bestandteile, die keine Abfälle sind, wieder für denselben Zweck verwendet werden, für den sie ursprünglich bestimmt waren (Art. 3, Nr. 13 [EC-2008a]).	Any operation by which products or components that are not waste are used again for the same purpose for which they were conceived (Art. 3, No. 13 [EC-2008a]).
Zirkularität (circularity)	Siehe Kapitel 9.7: Zirkularität beschreibt das Verhältnis im Kreislauf geführter Stoffströme zu allen in einer Volkswirtschaft oder volkswirtschaftlichen Region verarbeiteten Stoffströmen und ist ein Qualitätsmerkmal einer Circular Economy.	See Chapter 9.7: Circularity describes the ratio of circular material flows to all material flows processed in a national economy or economic region and is a quality feature of a circular economy.

12 Abkürzungsverzeichnis

[B]

BattG	Batteriegesetz
BauGB	Baugesetzbuch
BDE	Bundesverband der Deutschen Entsorgungs-, Wasser- und Rohstoffwirtschaft e.V.
BUMB	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit
bvse	Bundesverband Sekundärrohstoffe und Entsorgung e.V.

[C]

CCFL	Cold cathode fluorescent lamp (Kaltkathodenröhren)
CCS	Carbon capture and storage
CCU	Carbon capture and utilization
CE	Circular Economy
CFK	Carbonfaserverstärkter Kunststoff
ChemG	Chemikaliengesetz
CLP	Classification, labelling, and packaging
COSME	Competitiveness of Enterprises and Small and Medium-sized Enterprises (EU-Förderprogramm)
CRT	Cathode ray tube

[D]

DIHK	Deutscher Industrie- und Handelskammertag
DUH	Deutsche Umwelthilfe

[E]

EEB	European Environmental Bureau
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
ElektroG	Elektrogesetz
EMV	Elektromagnetische Verträglichkeit
EoL	End-of-Life
EoW	End-of-Waste
EPEA	Eastern Professional Electronics Association
ETRMA	European Tyre and Rubber Manufacturers Association

[F]

FEAD	Europäische Föderation der Entsorgungswirtschaft
FOEE	Friends of the Earth Europe

[G]

GFK	Glasfaserverstärkter Kunststoff
GFRP	Glass-fiber reinforced plastic

[I]

IIR	Isobutylene isoprene rubber (butyl rubber)
ITAD	Interessengemeinschaft der Thermischen Abfallbehandlungsanlagen in Deutschland e.V.
ITO	Indium-Zinkoxid

[K]

KrW/AbfG Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz

[L]

LCA Life cycle assessment

LCD Liquid crystal display

LED Lichtemittierende Dioden

LIFE Förderprogramm der EU für Umwelt, Naturschutz und Klimapolitik

[M]

MIWF Ministerium für Innovation, Wissenschaft und Forschung

MKULNV Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen

MWEIMH Ministerium für Wirtschaft, Energie, Industrie, Mittelstand und Handwerk des Landes Nordrhein-Westfalen

[N]

NABU Naturschutzbund Deutschland e.V.

NGO Non-governmental Organization (Nichtregierungsorganisation)

NR Natural Rubber

[O]

oLED Organische Leuchtdioden

öRE Öffentlich-rechtliche Entsorgungsträger

[P]

PAK Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe

PI Polyimid

PMMA Polymethylmethacrylat

ProdSG Produktsicherheitsgesetz

PPP Public Private Partnership

PS Polystyrol

[R]

REACH Registration, Evaluation, Authorisation and restriction of Chemicals

RoHS Restriction of Hazardous Substances

[S]

SBR Styrene-Butadiene Rubber

[T]

TRL Technology Readiness Level

TFT-LCD Thin film transistor liquid crystal display

[V]

VCI Verband der Chemischen Industrie e.V.

VKU Verband kommunaler Unternehmen

[W]

WEA Windenergieanlage

WEEE Waste electrical and electronic equipment

WVMetalle Wirtschaftsvereinigung Metalle

[Z]

ZDH Zentralverband des Deutschen Handwerks

ZVEI Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie

13 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1-1:	Betrachtete Produkte/Stoffströme	9
Tabelle 4-2:	Prinzipien einer Circular Economy	23
Tabelle 5-1:	Zusammensetzung von europäischen Reifen (Pkw, Lkw) [Sienkiewicz-2012], [Bally-2003]	27
Tabelle 5-2:	Übersicht Verwertungswege im Altreifenmarkt [GAVS-2016] und eigene Abschätzung der Erlöse	36
Tabelle 5-3:	Übersicht wichtiger Akteure im Altreifenmarkt	36
Tabelle 5-4:	Emissionswerte von konventionellen Pkw-Reifen [Bras-2011]	39
Tabelle 6-1:	Auswahl von Marktplätzen für gebrauchte WEA und Komponenten, verändert nach [Nühlen-2012]	58
Tabelle 6-2:	Exemplarische Rückbaukosten Windenergieanlage [Nordex- 2011]	59
Tabelle 7-1:	Recyclingquoten nach WEEE-Richtlinie [EP ER-2012] und ElektroG [ElektroG-2015]	79
Tabelle 7-2:	Umweltbelastungen durch die Herstellung, Nutzung und Entsorgung von LCD-Bildschirmen [Prakash-2011]	84
Tabelle 8-1:	Recyclingquoten der geltenden Verpackungsrichtlinie (RL 2004/12/EG) im Vergleich mit dem Legislativvorschlag der Europäischen Kommission sowie dem Umweltausschuss des Europäischen Parlamentes [EC-2015d]	97
Tabelle 9-1:	Betrachtete Produkte/Stoffströme	113
Tabelle 10-2:	Übersicht über die durch die CE-Kennzeichnung abgedeckten gesetzlichen Anforderungen an Computer- Bildschirme	138
Tabelle 11-1:	Definition der Begrifflichkeiten für die vorliegende Studie	140

14 Bildverzeichnis

Bild 1-1:	Vorgehen in der Studie	6
Bild 1-2:	Materialflüsse und Zirkularität in EU in Jahr 2005 – alle Werte in Milliarden Tonnen, nach [Haas-2015]	12
Bild 1-3:	Grenzen und Herausforderungen einer Circular Economy, eigene Darstellung	13
Bild 1-4:	Treiber für die Transformation zu einer Circular Economy, eigene Darstellung	13
Bild 1-5:	Maßnahmen zur Steigerung der Zirkularität von Industrieländern, eigene Darstellung	14
Bild 3-1:	Aufbau der Studie	16
Bild 3-2:	Vorgehen in der Studie	17
Bild 4-1:	Konzept einer Kreislaufwirtschaft als Gegenentwurf zur Durchflusswirtschaft, nach [Pflaum-1998], [Zahn-1996]	20
Bild 4-2:	Materialflussmodell für eine Volkswirtschaft, ergänzt und verändert nach [Haas-2015]	24
Bild 5-1:	Zusammensetzung Altreifen nach [Evans-2006]	26
Bild 5-2:	Reifen: Eigenschaften und Produktperformance nach [OECD-2014]	28
Bild 5-3:	Reifenlabel der EU-Verordnung [ETRMA-2011]	30
Bild 5-4:	Altreifen: Verwertungsquoten in Europa [ETRMA-2016a]	31
Bild 5-5:	Anteil der drei Hauptverwertungswege an der insgesamt verwerteten Menge [ETRMA-2016a]	32
Bild 5-6:	Rücknahmesysteme für Altreifen in der EU [ETRMA-2016a]	33
Bild 5-7:	Verwertungsoptionen nach der ersten Nutzungsphase	34
Bild 5-8:	Altreifen: Verwertungswege [ETRMA-2011]	35
Bild 5-9:	Lebenszyklus von Altreifen: Interessengruppen (eigene Darstellung)	37
Bild 5-10:	Bilanzierungsrahmen nach [Continental-1999]	39
Bild 5-11:	Treibhausgasbilanz von acht Verwertungsverfahren nach [Clauzade-2010b]	40
Bild 6-1:	Anzahl der Windenergieanlagen (WEA) in Deutschland, eigene Darstellung, Daten [Windguard-2015]	47
Bild 6-2:	Verteilung der WEA in Deutschland, eigene Darstellung, Daten nach [Lüers-2016b]	48
Bild 6-3:	Idealisierter Aufbau eines modernen Rotorblatts, eigene Darstellung	51
Bild 6-4:	Entwicklung von Leistung, mittlerem Rotordurchmesser und Nabenhöhe, eigene Darstellung nach [Nühlen-2012], Daten nach [Windmonitor-2016]	51
Bild 6-5:	Lebenszyklus von Rotorblättern	52

Bild 6-6:	Erwartete deutschlandweit zu entsorgende Windenergieanlagen, eigene Hochrechnung auf Datenbasis [Windguard-2015]	55
Bild 6-7:	Qualitative Darstellung von Einflussgrößen auf den Anfall von EoL-Rotorblattmaterial, eigene Darstellung	55
Bild 6-8:	Verfahrensübersicht zu Möglichkeiten der Faserverbundwerkstoffverwertung [Woidasky-2013]	61
Bild 6-9:	Altersstruktur der Anlagen, die das Ende ihrer Lebenszeit erreicht haben, eigene Darstellung	62
Bild 6-10:	Gebiete mit Windenergieanlagen am Ende des Lebenszyklus in Deutschland, eigene Darstellung	63
Bild 6-11:	Zentrale Akteure entlang der Wertschöpfungskette, eigene Darstellung	64
Bild 7-1:	Schematische Darstellung des Aufbaus eines TFT-LCD-Monitors [Telzerow-2007]	73
Bild 7-2:	Produktionsprozess von TFT-LCD Bildschirmen (modifiziert nach [Minami-2007]) und Aufbau eines TFT-LCD-Displays (eigene Darstellung und [MWEIMH-2016], [Sellin-2016], [Telzerow-2007])	75
Bild 7-3:	Zusammensetzung von LCD-Bildschirmgeräten in Gew.-% gemäß [Elektrocycling-2015], [Rotter-2012]	76
Bild 7-4:	Stoffflüsse für LCD-Computerbildschirme (vereinfacht) nach [Haberlag-2006], [Minami-2007], [LCD-2016]	77
Bild 7-5:	Übersicht zu Kosten und Erlösen bei der manuellen Demontage von LCD-Flachbildschirmen in einer österreichischen Erstbehandlungsanlage im Jahr 2009 nach [Salhofer-2011]	81
Bild 7-6:	Stoffflüsse für LCD-Computerbildschirme (detailliert) nach [Haberlag-2006], [Minami-2007], [LCD-2016]	82
Bild 7-7:	Beschäftigte des WZ08-383 »Rückgewinnung« im Zeitraum von 2008 - 2014 [Destatis-2016]	87
Bild 9-1:	Materialflüsse und Zirkularität in der Welt (2005) gemäß Modell aus Bild 4-2 – alle Werte in Milliarden Tonnen, nach [Haas-2015]	108
Bild 9-2:	Materialflüsse und Zirkularität in EU (2005) gemäß Modell aus Bild 4-2 – alle Werte in Milliarden Tonnen, nach [Haas-2015]	108
Bild 9-3:	Anteil Rohstoffarten an der weltweiten Rohstoffentnahme von 58 Milliarden Tonnen in 2005, nach [Haas-2015]	110
Bild 9-4:	Grenzen und Herausforderungen einer Circular Economy, eigene Darstellung	115
Bild 9-5:	Treiber für die Transformation zu einer Circular Economy, eigene Darstellung	123
Bild 9-6:	Quoten der Kreislaufwirtschaft für EoL-Abfall in Europa, nach [IW-2016]	125
Bild 9-7:	Maßnahmen zur Steigerung der Zirkularität von Industrieländern, eigene Darstellung	128

Bild 9-8:	Nischengeschäfte in der Abfallwirtschaft können die Transformation zu einer CE fördern [VDIN-2014]	129
-----------	--	-----

15 Quellenverzeichnis

- [ADAC-2016] Allgemeiner Deutscher Automobil-Club e.V. (2016): Rund um den Reifen. Zuletzt geprüft am: 02.12.2016. https://www.adac.de/infotestrat/reifen/rund_um_den_reifen/Alle_Fragen.aspx
- [Agatz-2014] Agatz, M. (2014): Windenergie-Handbuch 2014. Zuletzt geprüft am: 23.11.2016. <http://windenergie-handbuch.de/wp/wp-content/uploads/2015/03/Windenergie-Handbuch-2014.pdf>
- [AKE-2010] Arbeitskreis Energie in der Deutschen Physikalischen Gesellschaft (2010): Elektrizität: Schlüssel zu einem nachhaltigen und klimaverträglichen Energiesystem, Bad Honnef. Zuletzt geprüft am: 02.12.2016. http://www.dpg-physik.de/veroeffentlichung/broschueren/studien/energie_2010.pdf
- [Albers-2009] Albers, H.; Seifert, H.; Kühne, U. (2009): Recycling of Wind Turbine Rotor Blades - Fact or Fiction. In: *DEWI Magazin*, (No. 34). Zuletzt geprüft am: 02.12.2016. http://www.dewi.de/dewi_res/fileadmin/pdf/publications/Magazin_34/05.pdf
- [Albers-2016a] Albers, H. (2016): »Recycling von GFK aus Rotorblättern: Bedarfe und Entwicklungen« (Tagung Rotorblätter von Windenergieanlagen, 16.06.-17.06.2016, Essen). Zuletzt geprüft am: 23.11.2016
- [Albers-2016b] Albers, H.; Germer, F.; Greiner, S.; Pehlken, A. (2016): Aktuelle Ansätze bei der Erfassung und Verwertung von Windenergieanlagen (12. Leipziger Deponiefachtagung, 08.03.-09.03.2016). Zuletzt geprüft am: 02.12.2016. <http://stoffstrom.informatik.uni-oldenburg.de/images/pdf/AlbersGermerPehlken-DFT-Leipzig-Rev04-final-070316part1.pdf>
- [Allwood-2011] Allwood, J. M.; Ashby, M. F.; Gutowski, T. G.; Worrell, E. (2011): Material efficiency: A white paper. In: *Resources, Conservation and Recycling*, 55(3), S. 362–381
- [AOC-2016] AOC Europe: About AOC. Zuletzt geprüft am: 19.11.2016. <http://aoc-europe.com/de/content/about-aoc>
- [AUTO PLUS-2016] AUTO PLUS Fahrzeugzubehör GmbH (2016): Profiltiefe. Wien. Zuletzt geprüft am: 22.11.2016. http://www.winterreifen-pflicht.at/profiltiefe_winterreifen.html
- [Ayres-1989] Ayres, R. U. (1989): Industrial metabolism. In: *Technology and environment*, S. 23–49
- [Ayres-1994] Ayres, R. U. (1994): Industrial Metabolism: Theory and Policy. In: Allenby, B. R.; Richards, D. J. (Hrsg.): *The Greening of Industrial Ecosystems*; 1994. Washington, D.C.: National Academy Press, S. 23–37
- [Bade-2005] Bade, P. (2005): Windkraftanlagen: Grundlagen, Entwurf, Planung und Betrieb

- [Bally-2003] Bally, A. (2003): Altreifenentsorgung: Was ist ökologisch sinnvoll? Verkehrs-Club der Schweiz VCS, Bern. Zuletzt geprüft am: 02.12.2016. http://www.bicon-ag.com/gutachten-uvp/VCS_Altreifen_BiCon_2003.pdf
- [Bartnik-2014] Bartnik, S.; Löhle, S.; Müller, M. (2014): Recyclinggerechte Produktkonzeption von Elektro(nik)-geräten zur Förderung der Produktverantwortung. In: *Müll und Abfall*, 5, S. 263–271
- [Baulexikon-2016] Das Baulexikon (2016): Kreislaufwirtschaft. <http://www.das-baulexikon.de/lexikon/Kreislaufwirtschaft.htm>
- [BDE-2016] BDE (14.03.2016): EU-Kreislaufwirtschaftspaket: BDE veröffentlicht Stellungnahme. Zuletzt geprüft am: 13.09.2016. <https://bde.de/assets/newsletterpdfs/pressemitteilung/2016/PM-16-03-14-Krw-Paket.pdf>
- [Beauson-2014] Beauson, J.; Blech, J. I.; Brondsted, P. (2014): Composite recycling: Characterizing end of life wind turbine blade material. In: *Proceedings of 19th International Conference on Composite Materials*. Denmark. Zuletzt geprüft am: 13.07.2016. http://orbit.dtu.dk/files/93594140/COMPOSITE_RECYCLING.pdf
- [Beckmann-2009] Beckmann, J. (2009): Einstufung, Verwertung und Entsorgung von LCD-Bildschirmen. Zuletzt geprüft am: 02.12.2016. <http://www-test.wwa.bayern.de/abfall/fachwissen/298/einstufung-verwertung-entsorgung-lcd-bildschirmen>
- [Bergmann-2015] Bergmann, A. (2015): Windenergieanlagen: Normgerecht errichten, betreiben, herstellen und konstruieren ; Erläuterungen zu den Normen der Reihe DIN EN 61400 (VDE 0127) und DIN EN 60076-1 (VDE 0532-76-16) und unter Berücksichtigung der VDE-Anwendungsregel VDE-AR-N 4105 und weiterer Regelwerke, 2. Aufl. Berlin, Offenbach: VDE-Verl. (VDE-Schriftenreihe - Normen verständlich, 158)
- [Bertling-2002] Bertling, J. (2002): Altgummirecycling: Kurseinheit Kreislaufwirtschaft. Zuletzt geprüft am: 22.11.2016
- [BGR-2006] Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Fraunhofer (ISI), Rheinisch-Westfälisches Institut für Wirtschaftsforschung (2006): Trends der Angebots- und Nachfragesituation bei mineralischen Rohstoffen: Endbericht. Hannover
- [BGR-2010] Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (2010): Reserven, Ressourcen und Verfügbarkeit von Energierohstoffe 2010: Kurzstudie. BGR: Hannover
- [BGR-2016] Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (2016): Deutschland - Rohstoffsituation 2015
- [Bhakar-2015] Bhakar, V.; Agur, A.; Digalwar, A. K.; Sangwan, K. S. (2015): Life Cycle Assessment of CRT, LCD and LED Monitors. In: *Procedia CIRP*, 29, S. 432–437
- [Bihl-2004] Bihl, C. (2004): Erschließung und Einsatz mineralischer Sekundärrohstoffe als Puffersubstanzen im Bodenschutz im Wald: Dissertation zur Verleihung des akademischen Grades doctor rerum naturalium (Dr. rer. nat.).

- Zuletzt geprüft am: 20.01.2017. <https://www.deutsche-digitale-biblio-thek.de/binary/3P2L4P3NGOYHQ3ES4ZQJPXQ24XY3KETW/full/1.pdf>
- [BiPRO-2016] Zotz, F.; Weißenbacher, J.; Dollhofer, M.; Greßmann, A. (2016): Evaluation der ökologischen und ökonomischen Auswirkungen des Wegfalls der Heizwertregelung des § 8 Abs. 3 Satz 1 KrWG. München: BiPRO GmbH (Umweltforschungsplan des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, 2298)
- [Bittmann-2016] Bittmann, E. (2016): Reaktivsysteme und Faserverbundkunststoffe. In: *Kunststoffe - Carl Hanser Verlag, München*, (10), S. 116–122
- [BLAC-2012] Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Chemikaliensicherheit (2012): Bericht zum nationalen Überwachungsschwerpunkt »PAK in Reifen«. Zuletzt geprüft am: 02.12.2016. http://www.blac.de/servlet/is/2146/Bericht_PAK_in_Reifen.pdf?command=downloadContent&filename=Bericht_PAK_in_Reifen.pdf
- [BLU-2013] Bayerisches Landesamt für Umwelt (2013): Gebraucht- und Altreifen. Zuletzt geprüft am: 29.07.2016. <http://www.abfallratgeber.bayern.de/publikationen/doc/infoblaetter/altreifen.pdf>
- [BMBF-2013] Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) (2013): Zukunftsbild »Industrie 4.0«. Zuletzt geprüft am: 22.11.2016. https://www.bmbf.de/pub/Zukunftsbild_Industrie_4.0.pdf
- [BMJV-2012] KrWG (2016): Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (Kreislaufwirtschaftsgesetz - KrWG)
- [BMUB-2016] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit: Abfallwirtschaft in Deutschland 2016 – Fakten, Daten, Grafiken. Berlin
- [BMUB-2016a] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (2016a): Stellungnahme der Regierung der Bundesrepublik Deutschland vom 18. Februar 2016 zu den Legislativvorschläge aus dem Kreislaufwirtschaftspaket der KOM. Zuletzt geprüft am: 13.09.2016
- [BMW-2015] Mrotzek-Blöß, A.; Nühlen, J.; Pflaum, H.; Rettweiler, M.; Kroop, S.; Reh, K.; Franke, M. (2015): Recyclingpotenzial von Technologiemetallen und anderen kritischen Rohstoffen als wichtige Säule der Rohstoffversorgung (Recyclingpotenzial Technologiemetalle): Kurzstudie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi). Oberhausen und Sulzbach-Rosenberg
- [Böni-2011] Böni, H.; Widmer, R. (März 2011): Entsorgung von Flachbildschirmen in der Schweiz: Schlussbericht. Zuletzt geprüft am: 16.11.2016
- [Böni-2015] Böni, H.; Wäger, P.; Thiébaud, E.; Du, X.; Figi, R.; Nagel, O.; Bunge, R.; Stäubli, A.; Spörry, A.; Wolfensberger-Malo, M.; Brechbühler-Peskova, M.; Grösser, S. (2015): Rückgewinnung von kritischen Metallen aus Elektronikschrott am Beispiel von Indium und Neodym: Schlussbericht Projekt e-Recmet. St. Gallen

- [Bönisch-2012] Bönisch, B.; Schmidt, S. (2012): Qualitative Analyse der Hemmnisse des Repowering von Windenergieanlagen: Studienbericht. Zuletzt geprüft am: 21.11.2016. http://www.fachagentur-windenergie.de/fileadmin/files/Akzeptanz/Hemmnisanalyse_Webversion.pdf
- [Boulding-1966] Boulding, K. E. (1966): The Economics of the Coming Spaceship Earth. Zuletzt geprüft am: 02.12.2016. <http://www.ub.edu/prometheus21/articulos/obsprometheus/BOULDING.pdf>
- [Bras-2011] Bras, B.; Cobert, A. (2011): Life-Cycle Environmental Impact of Michelin Tweel ® Tire for Passenger Vehicles. In: *SAE International Journal of Passenger Cars - Mechanical Systems*, 4(1), S. 32–43
- [Braungart-1999] Braungart, M.; McDonough, W. (1999): Die nächste industrielle rEvolution. In: *Politische Ökologie*, 17(62), S. 18–22
- [Braungart-2007] Braungart, M.; McDonough, W.; Bollinger, A. (2007): Cradle-to-cradle design: Creating healthy emissions – a strategy for eco-effective product and system design. In: *Journal of Cleaner Production*, 15(13-14), S. 1337–1348
- [Brebba-2007] Brebba, C. A.; Popov, V. (Hrsg.) (20-22 June 2007): ENERGY 2007
- [Buchert-2012] Buchert, M.; Manhart, A.; Bleher, D.; Pingel, D. (2012): Recycling kritischer Rohstoffe aus Elektronik-Altgeräten: Fachbericht 38 des Öko-Instituts im Auftrag des LANUV Nordrhein-Westfalen. Recklinghausen. Zuletzt geprüft am: 28.10.2016. https://www.lanuv.nrw.de/uploads/tx_commercedownloads/30038.pdf
- [Buchert-2016] Buchert, M.; Manhart, A. (2016): Recycling global- Best-of-two-Worlds Projekt und Recycling von Blei-Säure-Batterien in Afrika. Zuletzt geprüft am: 02.12.2016. http://www.vivis.de/phocadownload/2016_rur/2016_RuR_123-140_Buchert.pdf
- [BUND-2014] Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland (2014): Fleischatlas: Daten und Fakten über Tiere als Nahrungsmittel
- [Bunge-2016] Bunge, R. (2016): Recycling ist gut, mehr Recycling ist besser – oder nicht? In: Thomé-Kozmiensky, K.-J. (Hrsg.): *Recycling und Rohstoffe. Band 9*; 2016. Berlin: TK-Verlag, S. 79–92
- [bvse-2015] bvse (02.12.2015): Kreislaufwirtschaftspaket der EU ist nur eine Light-Version. Zuletzt geprüft am: 02.12.2016. <http://www.88energie.de/bvse-eu-kreislaufwirtschaftspaket-ist-nur-eine-light-version-1294756.html/>
- [BWE-2004] BWE Bundesverband WindEnergie (2004): Überprüfung des Zustandes des Blitzschutzsystems von Windenergieanlagen. Zuletzt geprüft am: 12.10.2016. <https://www.windenergie.de/sites/default/files/attachments/page/sachverstaendigenbeirat/blitzschutzsystem-pruefung.pdf>

- [BWE-2012] BWE Bundesverband WindEnergie (2012): Repowering von Windenergieanlagen - Effizienz, Klimaschutz, regionale Wertschöpfung. Berlin. Zuletzt geprüft am: 24.11.2016. https://www.windenergie.de/sites/default/files/download/publication/repowering-von-windenergieanlagen/repoweringbroschuere_2012_web.pdf
- [BWE-2015] BWE Bundesverband WindEnergie (2015): A bis Z: Fakten zur Windenergie Von A wie Arbeitsplätze bis Z wie Ziele der Energieversorgung
- [CEN-1999] CEN (1999): Ergonomische Anforderungen für Tätigkeiten an optischen Anzeigeeinheiten in Flachbauweise: EN ISO 13406-1 Deutsche Fassung. London
- [Christman-2014] Christman et al. (Mai 2014): Report on critical raw materials for the EU. Zuletzt geprüft am: 08.11.2016. http://www.catalysiscluster.eu/wp/wp-content/uploads/2015/05/2014_Critical-raw-materials-for-the-EU-2014.pdf
- [Clauzade-2010a] Clauzade, C.; Osset, P.; Hugrel, C.; Chappert, A.; Durande, M.; Palluau, M. (2010): Life cycle assessment of nine recovery methods for end-of-life tyres. In: *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 15(9), S. 883–892
- [Clauzade-2010b] Clauzade, C.; Osset, P.; Hugrel, C.; Chappert, A.; Durande, M.; Palluau, M. (2010): Life cycle assessment of nine recovery methods for end-of-life tyres: Reference document, R&D Aliapur (9)
- [Computerbild-2007] Computerbild (2007): Wissen – LCD-Monitore. Zuletzt geprüft am: 22.03.2017. <http://www.computerbild.de/artikel/cbs-Tests-Hardware-Monitore-von-19-bis-22-Zoll-im-Testlabor-1869431.html>
- [Continental-1999] Continental AG (1999): Produkt-Ökobilanz eines PKW-Reifens. Zuletzt geprüft am: 04.08.2016. http://www.continental-corporation.com/www/download/csr_com_de/themen/umwelt/download/oekobilanz_pdf_de.pdf
- [Continental-2015] Continental AG (2015): Jeder gebrauchte Continental Lkw-Reifen wird noch gebraucht: ContiLifeCycle™. Zuletzt geprüft am: 23.11.2016. <http://blobs.continental-tires.com/www8/servlet/blob/785098/21a68ed3a56cca46174fc1ef1515a4ae/contilifecycle-broschuere-data.pdf>
- [Covestro-2016] Covestro Deutschland AG (2016): Erstes Polyurethan-Rotorblatt in Asien produziert. Zuletzt geprüft am: 01.12.2016. [http://presse.covestro.de/news.nsf/id/6038067DD759F4B0C1257FC5004037FA/\\$File/2016-043.pdf?open&mod=25.08.2016_14:44:49](http://presse.covestro.de/news.nsf/id/6038067DD759F4B0C1257FC5004037FA/$File/2016-043.pdf?open&mod=25.08.2016_14:44:49)
- [Cucchiella-2015] Cucchiella, F.; D'Adamo, I.; Koh, S.; Rosa, P. (2015): Recycling of WEEEs: An economic assessment of present and future e-waste streams. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015(51), S. 263–272
- [Deerberg-2016] Deerberg, G.; Franke, M.; Reh, K.; Kroop, S.; Mrotzek-Blöß, A.; Müller, T. (2016): Industrie 4.0 – Bedeutung für die Abfallwirtschaft. In: Thomé-

- Kozmiensky, K.-J. (Hrsg.): *Recycling und Rohstoffe. Band 9*; 2016. Berlin: TK-Verlag, S. 3–26
- [Destatis-2015] Statistisches Bundesamt (5.6.2015): Fachserie 4 Reihe 4.3 Kostenstruktur der Unternehmen des Verarbeitenden Gewerbes sowie des Bergbaus und der Gewinnung von Steinen und Erden (2013): Fachserie 4 Reihe 4.3. Wiesbaden. Zuletzt geprüft am: 21.11.2016
- [Destatis-2016] Statistisches Bundesamt (2016): Beschäftigte, Umsatz, Produktionswert und Wertschöpfung der Unternehmen in der Energie- und Wasserversorgung: Deutschland, Jahre, Wirtschaftszweige. Wiesbaden. Zuletzt geprüft am: 11.10.2016
- [DESTATIS-2016] Statistisches Bundesamt DESTATIS (2016): Statistisches Jahrbuch 2016 – Teil 18 Umwelt. Wiesbaden
- [Destatis-2017] Statistisches Bundesamt (2017): Dissipative Verluste. Zuletzt geprüft am: 25.01.2017.
<https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/GesamtwirtschaftUmwelt/Umwelt/UmweltoekonomischeGesamtrechnungen/Glossar/DissipativeVerluste.html>
- [DIBt-2012] Deutsches Institut für Bautechnik: Richtlinie für Windenergieanlagen, 2012
- [DIHK-2016] DIHK (12.02.2016): Stellungnahme Kreislaufwirtschaftspaket. Zuletzt geprüft am: 10.08.2016.
http://www.dihk.de/isuche?fq_dokumentart=%22PDF%22&facet=true&facet.field=kategorie&facet.field=dokumentart&von=&bis=&istAnlage=True&SearchableText=Kreislaufwirtschaftspaket
- [DNVGL-2015] DNVGL (2015): DNVGL-ST-0376 Rotor blades for wind turbines. Zuletzt geprüft am: 23.11.2016.
<http://rules.dnvgl.com/docs/pdf/DNVGL/ST/2015-12/DNVGL-ST-0376.pdf>
- [DNVGL-2016] DNVGL (2016): DNVGL-ST-0262 Lifetime extension of wind turbines. Zuletzt geprüft am: 23.11.2016.
<http://rules.dnvgl.com/docs/pdf/DNVGL/ST/2016-03/DNVGL-ST-0262.pdf>
- [Draws-2016] Reifen Draws GmbH: Altreifenentsorgung. Zuletzt geprüft am: 27.10.2016. <http://www.altreifenentsorgung.de/altreifenentsorgung/>
- [DStGB-2009] DStGB (2009): Dokumentation Nr. 94: Repowering von Windenergieanlagen - Kommunale Handlungsmöglichkeiten. Zuletzt geprüft am: 21.11.2016.
http://www.umweltaktion.de/pics/medien/1_1253019506/Doku94_Repowering_barrierefrei.pdf
- [DUH-2016] DUH (26.05.2016): Gemeinsame Stellungnahme der DUH, des SIM, der CEGROBB, der BV GFGH, des Verbandes des deutschen Getränke Einzelhandels, des SIB sowie des Verbandes Privater Brauereien Deutschlands zum EU-Kreislaufwirtschaftspaket. Zuletzt geprüft am: 13.09.2016.
http://www.duh.de/uploads/tx_duhdownloads/160526_DUH_Position_Paper_Circular_Economy_German_English.pdf

- [EAR-2016] Stiftung Elektro-Altgeräte Register (2016): Zusammensetzung gemischter Sammelgruppen. Zuletzt geprüft am: 20.11.2016. <https://www.stiftung-ear.de/service/kennzahlen/zusammensetzung-gemischter-sammelgruppen/>
- [Ebelt-2006] Stefan Ebelt: Elektrolytkondensatoren in Computern. Zuletzt geprüft am: 24.10.2016. http://www.reuse-computer.org/fileadmin/user_upload/documents/Dialog.5/AuskunftElKos06.pdf
- [EC-2008] Europäische Kommission (16. Dezember 2008): Verordnung (EG) Nr. 1272/2008 des europäischen Parlaments und des Rates über die Einstufung, Kennzeichnung und Verpackung von Stoffen und Gemischen, zur Änderung und Aufhebung der Richtlinien 67/548/EWG und 1999/45/EG und zur Änderung der Verordnung (EG) Nr. 1907/2006: CLP-Verordnung
- [EC-2008a] Europäische Kommission (2008): Richtlinie 2008/98/EG des europäischen Parlaments und des Rates über Abfälle und zur Aufhebung bestimmter Richtlinien
- [EC-2008b] European Commission (2008): Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the council of 19 November 2008 on waste and repealing certain Directives
- [EC-2015] European Commission (2015): Circular Economy Package: Questions & Answers. Zuletzt geprüft am: 29.09.2016. http://europa.eu/rapid/press-release_MEMO-15-6204_en.htm
- [EC-2015a] Europäische Kommission (2.12.2015): Den Kreislauf schließen – Ein Aktionsplan der EU für die Kreislaufwirtschaft: Mitteilung der Kommission an das europäische Parlament, den Rat, den europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen. Brüssel. Zuletzt geprüft am: 10.08.2016
- [EC-2015c] Europäische Kommission (2.12.2015): Vorschlag für eine Richtlinie des europäischen Parlaments und des Rates zur Änderung der Richtlinie 2008/98/EG über Abfälle. Zuletzt geprüft am: 14.11.2016
- [EC-2015d] Europäische Kommission (2.12.2015): Vorschlag für eine Richtlinie des europäischen Parlaments und des Rates zur Änderung der Richtlinie 94/62/EG über Verpackungen und Verpackungsabfälle. Brüssel. Zuletzt geprüft am: 10.08.2016
- [EC-2015e] Europäische Kommission (2.12.2015): Vorschlag für eine Richtlinie des europäischen Parlaments und des Rates zur Änderung der Richtlinie 1999/31/EG über Abfalldeponien. Brüssel. Zuletzt geprüft am: 10.08.2016
- [EC-2015f] Europäische Kommission (02.12.2015): Vorschlag für eine Änderung der WEEE-RL. Zuletzt geprüft am: 30.08.2016. <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:52015PC0593&from=DE>
- [EC-2015g] Europäische Kommission (2.12.2015): Vorschlag für eine Richtlinie des europäischen Parlaments und des Rates zur Änderung der Richtlinie

- 2000/53/EG über Altfahrzeuge, der Richtlinie 2006/66/EG. Brüssel. Zuletzt geprüft am: 10.08.2016
- [EC-2016] Europäische Kommission (16.12.2008): Regulation (EC) No 1272/2008 of the European Parliament and of the council of 16 December 2008 on classification, labelling and packaging of substances and mixtures, amending and repealing Directives 67/548/EEC and 1999/45/EC, and amending Regulation (EC) No 1907/2006: CLP-Regulation
- [EC-2016] Europäische Kommission (19. Juli 2016): EU geht rechtlich gegen Ausfuhrbeschränkungen für chinesische Rohstoffe vor: Pressemitteilung. Zuletzt geprüft am: 10.08.2016. http://europa.eu/rapid/press-release_IP-16-2581_de.htm?locale=en
- [EEA-2011] European Environment Agency (2011): Earnings, jobs and innovation: the role of recycling in a green economy
- [EEB-2016] EEB (2016): EEB Position Paper on the EU Circular Economy Package. Zuletzt geprüft am: 14.09.2016. <http://www.eeb.org/index.cfm/library/eeb-position-paper-on-the-circular-economy-package/>
- [EFA-2016] EFA (2016): Ressourceneffizienz in der Kreislaufwirtschaft - NRW-Umweltministerium lädt am 14.09. zur Dinner Debate in die NRW-Landesvertretung nach Brüssel. Zuletzt geprüft am: 18.11.2016. <http://www.ressourceneffizienz.de/aktuelles-termine/termine/detailansicht-termine/news/detail/News/ressourceneffizienz-in-der-kreislaufwirtschaft-nrw-umweltministerium-laedt-am-1409-zur-dinner-de.html>
- [Elektrocycling-2015] Elektrocycling GmbH (30.11.2015): Verbundprojekt »InAccess«: Entwicklung eines ressourceneffizienten und wirtschaftlichen Recyclingprozesses für LCD-Bildschirmgeräte unter besonderer Berücksichtigung der Rückgewinnung des Indium-Inhalts. Abschlussbericht
- [ElektroG-2015] ElektroG (2015): Gesetz über das Inverkehrbringen, die Rücknahme und die umweltverträgliche Entsorgung von Elektro- und Elektronikgeräten: Elektro- und Elektronikgerätegesetz – ElektroG. Zuletzt geprüft am: 30.08.2016. http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/elektrog_2015/gesamt.pdf
- [EMF-2016] Ellen MacArthur Foundation (2016): Circular Economy. Zuletzt geprüft am: 03.06.2016. <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/circular-economy>
- [Enquete-1998] Deutscher Bundestag (1998): Abschlußbericht der Enquete-Kommission »Schutz des Menschen und der Umwelt - Ziele und Rahmenbedingungen einer nachhaltig zukunftsverträglichen Entwicklung«: Konzept Nachhaltigkeit. Vom Leitbild zur Umsetzung
- [Enquete-2015a] Europäisches Parlament (9.7.2015): Ressourceneffizienz: Wege zu einer Kreislaufwirtschaft, Entschließung des Europäischen Parlaments vom 9. Juli 2015 zu dem Thema »Ressourceneffizienz: Wege zu einer Kreislaufwirtschaft« (2014/2208(INI)). Zuletzt geprüft am: 17.11.2016. <http://www.europarl.europa.eu/sides/getDoc.do?pubRef=-//EP//NONSGML+TA+P8-TA-2015-0266+0+DOC+PDF+V0//DE>

- [Enquete-2015b] Landtag NRW (2015): Enquetekommission zur Zukunft der chemischen Industrie in Nordrhein-Westfalen im Hinblick auf nachhaltige Rohstoffbasen, Produkte und Produktionsverfahren. Landtag NRW
- [EP ER-2003] Europäisches Parlament und Rat (2003): Richtlinie 2002/95/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 27. Januar 2003 zur Beschränkung der Verwendung bestimmter gefährlicher Stoffe in Elektro- und Elektronikgeräten: 27.01.2003. Zuletzt geprüft am: 07.11.2016. <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32002L0095&from=EN>
- [EP ER-2006] Europäisches Parlament und Rat (2006): Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 des europäischen Parlaments und des Rates vom 18. Dezember 2006: REACH
- [EP ER-2008] Europäisches Parlament und Rat (2008): Richtlinie 2008/98/EG des europäischen Parlaments und des Rates vom 19. November 2008 über Abfälle und zur Aufhebung bestimmter Richtlinien. Brüssel
- [EP ER-2009a] Europäisches Parlament und Rat (2009): Richtlinie 2009/125/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 21. Oktober 2009 zur Schaffung eines Rahmens für die Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung energieverbrauchsrelevanter ProdukteText von Bedeutung für den EWR. Zuletzt geprüft am: 18.11.2016. <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:285:0010:0035:de:PDF>
- [EP ER-2009b] Europäisches Parlament und Rat (2009): Verordnung Nr. 1222/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 25. November 2009 über die Kennzeichnung von Reifen in Bezug auf die Kraftstoffeffizienz und andere wesentliche Parameter
- [EP ER-2012] Europäisches Parlament und Rat (2012): Richtlinie 2012/19/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 4. Juli 2012 über Elektro- und Elektronik-AltgeräteText von Bedeutung für den EWR: WEEE-Richtlinie. EP ER-2012. Zuletzt geprüft am: 30.08.2016. <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2012:197:0038:0071:de:PDF>
- [EP ER-2013] Europäisches Parlament und Rat (2013): Amtsblatt der Europäischen Union: Beschluss Nr. 1386/2013/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 20. November 2013 über ein allgemeines Umweltaktionsprogramm der Union für die Zeit bis 2020 »Gut leben innerhalb der Belastbarkeitsgrenzen unseres Planeten«
- [EP ER-2016] European Parliament and Council: Regulation (EC) No 1907/2006 of the European Parliament and of the Council: REACH
- [EP-2016] Europäisches Parlament: Ausschuss für Umweltfragen, öffentliche Gesundheit und Lebensmittelsicherheit; Berichterstatterin: Simona Bonafè (2016): Entwurf eines Berichts über den Vorschlag für eine Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates zur Änderung der Richtlinie 2000/53/EG über Altfahrzeuge, der Richtlinie 2006/66/EG über Batterien und Akkumulatoren sowie Altbatterien und Altakkumulatoren sowie der

- Richtlinie 2012/19/EU über Elektro- und Elektronik-Altgeräte (COM(2015)0593 – C8-0383/2015 – 2015/0272(COD)). Brüssel
- [Eppenberger-2011] Eppenberger, R.; Böni, H. (2011): Fachbericht 2011: Fachbericht SENS, SWICO Recycling und SLRS. Zürich, Schweiz
- [ETRMA-2011] European Tyre and Rubber Manufacturers Association (2011): End of Life Tyres. Zuletzt geprüft am: 23.11.2016. <http://www.etrma.org/tyres/ELTs>
- [ETRMA-2011] European Tyre and Rubber Manufacturers Association (2011): European Tyre Labelling Regulation: (EC/1222/2009)
- [ETRMA-2015a] European Tyre and Rubber Manufacturers Association (2015): ETRMA Position Paper on Circular Economy: Bringing about a resource efficient and competitive Europe. Brüssel. Zuletzt geprüft am: 02.12.2016. http://www.etrma.org/uploads/Modules/Newsroom/2015-09-29_etrma-position-paper-on-circular-economy_vf.pdf
- [ETRMA-2015b] European Tyre and Rubber Manufacturers Association (2015): Statistics. Edition 2014
- [ETRMA-2015c] European Tyre and Rubber Manufacturers Association (2015): The European Tyre Industry. Facts and Figures: 2015 edition. Zuletzt geprüft am: 05.12.2016. <http://www.etrma.org/uploads/documents/20151214-%20Statistics%20booklet%202015%20FINAL2.pdf>
- [ETRMA-2016a] European Tyre and Rubber Manufacturers Association (2016): End-of-Life Tyre Report 2015. Zuletzt geprüft am: 05.12.2016. <http://www.etrma.org/uploads/Modules/Documentsmanager/elt-report-v9a---final.pdf>
- [ETRMA-2016b] European Tyre and Rubber Manufacturers Association (2016): Statistics. Edition 2015. Zuletzt geprüft am: 05.12.2016. <http://www.etrma.org/uploads/documents/20151214-%20Statistics%20booklet%202015%20FINAL2.pdf>
- [Eugster-2008] Eugster, M. (17.06.08): ICTs: from Cradle to e-Waste: A Life Cycle Assessment Study of Desktop PC Systems. London (ITU Symposium)
- [EU-KOM-2010] Europäische Kommission (2010): Mitteilung der Kommission: Europa 2020: Eine Strategie für intelligentes, nachhaltiges und integratives Wachstum. Brüssel
- [EU-KOM-2011] Europäische Kommission (2011): Europäische Kommission: Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen, Ressourcenschonendes Europa – eine Leitinitiative innerhalb der Strategie Europa 2020. Brüssel
- [EU-KOM-2013] Europäische Kommission (2013): Grünbuch zu einer europäischen Strategie für Kunststoffabfälle in der Umwelt. Brüssel
- [EU-KOM-2014] Europäische Kommission (2014): Europäische Kommission: Vorschlag für eine Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates zur Änderung der Richtlinien zur Änderung der Richtlinien 2008/98/EG über Abfälle, 94/62/EG über Verpackungen und Verpackungsabfälle, 1999/31/EG über

- Abfalldeponien, 2000/53/EG über Altfahrzeuge, 2006/66/EG über Batterien und Akkumulatoren sowie Altbatterien und Altakkumulatoren sowie 2012/19/EU über Elektro- und Elektronik-Altgeräte. Brüssel
- [Eurostat-2016] Eurostat (2016): Sammlung von Elektro- und Elektronikgeräte-Abfall nach Land, Jahr und Geräte-Kategorie, in Tonnen, Prozent und Anzahl. Brüssel. Zuletzt geprüft am: 31.10.2016. <http://appsso.eurostat.ec.europa.eu>
- [EUWID-2016] Europäischer Wirtschaftsdienst GmbH: Kunststoff: 28/2016, S. 6. Gernsbach. Zuletzt geprüft am: 23.11.2016
- [EUWID-2016a] Europäischer Wirtschaftsdienst GmbH (2016): Weniger Altreifen in Deutschland. Zuletzt geprüft am: 23.11.2016. <http://www.euwid-recycling.de/news/wirtschaft/einzelansicht/Artikel/weniger-altreifen-in-deutschland.html>
- [Evans-2006] Evans, A.; Evans, R. (2006): The Composition of a Tyre: Typical Components. Zuletzt geprüft am: 05.12.2016. <http://www.wrap.org.uk/sites/files/wrap/2%20-%20Composition%20of%20a%20Tyre%20-%20May%202006.pdf>
- [EWEA-2013] EWEA - The European Wind Energy Association (2013): Research not outline on recycling wind turbine blades: Annual Report. Zuletzt geprüft am: 22.08.2016. http://www.ewea.org/fileadmin/files/our-activities/policy-issues/environment/research_note_recycling_WT_blades.pdf
- [EWSA-2016] Europäischer Wirtschafts- und Sozialausschuss (Juni 2016): Das Kreislaufwirtschaftspaket - Positionspapier. Zuletzt geprüft am: 13.09.2016. <http://www.eesc.europa.eu/resources/docs/circulareconomy-ppaper-de.pdf>
- [Eyerer-1996] Eyerer, P. (Hrsg.) (1996): Ganzheitliche Bilanzierung: Werkzeug zum Planen und Wirtschaften in Kreisläufen. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg
- [Faulstich-2010] Faulstich, M. (2010): r³ - Innovative Technologien für Ressourceneffizienz - Strategische Metalle und Mineralien: Informationspapier zum Forschungs- und Entwicklungsbedarf der gleichnamigen BMBF-Fördermaßnahme
- [FA-Wind-2016] Fachagentur Windenergie (2016): Erneuerbare-Energien-Gesetz. <http://www.fachagentur-windenergie.de/themen/eeg.html>
- [FEAD-2016] Fédération Européenne des Activités de la Dépollution et de l'Environnement (2016): FEAD Position Paper on the Circular Economy Package. Brüssel. Zuletzt geprüft am: 14.09.2016. http://www.fead.be/images/PDF/position_papers/2016/FEAD_position_paper_-_FINAL.pdf
- [Feraldi-2012] Feraldi, R.; Cashman, S.; Huff, M.; Raahauge, L. (2012): Comparative LCA of treatment options for US scrap tires: Material recycling and tire-derived fuel combustion. In: *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 18(3), S. 613–625

- [Fiksel-2011] Fiksel, J.; Bakshi, B. R.; Baral, A.; Guerra, E.; DeQuervain, B. (2011): Comparative life cycle assessment of beneficial applications for scrap tires. In: *Clean Technologies and Environmental Policy*, 13(1), S. 19–35
- [FOE-2010] Friends of the Earth (2010): More jobs, less waste: Potential for job creation through higher rates of recycling in the UK and the EU. London. Zuletzt geprüft am: 10.10.2016.
https://www.foe.co.uk/sites/default/files/downloads/jobs_recycling.pdf
- [FOEE-2015] Friends of the Earth Europe (2015): Wasted year for the circular economy. Zuletzt geprüft am: 14.09.2016. <http://foeeurope.org/wasted-year-for-circular-economy-021215>
- [Friege-1998] Friege, H.; Engelhardt, C.; Henseling, K. O. (Hrsg.) (1998): Das Management von Stoffströmen: Geteilte Verantwortung - Nutzen für alle. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg
- [Fröhlich-2015] Fröhlich, H. (2015): Recycling von LCD-Bildschirmgeräten. In: Thomé-Kozmiensky, K.-J.; Goldmann, D. (Hrsg.): *Recycling und Rohstoffe*; 2015, S. 313–324
- [Fronde-2012] Frondel, M. (2012): Der Rebound-Effekt von Energieeffizienz-Verbesserungen. In: *Energiewirtschaftliche Tagesfragen*, 62(8)
- [GAVS-2016] Gesellschaft für Altgummi-Verwertungs-Systeme mbH (2016): Altreifenverwertung in Deutschland. Frankfurt am Main. Zuletzt geprüft am: 27.10.2016. <http://www.euwid-recycling.de/news/wirtschaft/einzelansicht/Artikel/weniger-altreifen-in-deutschland.html>
- [Geocycle-2016] Geocycle Deutschland (2016): Verwertung von Rotorblättern - ein Beitrag zur Nachhaltigkeit: Flyer: »Nachhaltige Verwertung von Rotorblättern im Zementwerk Lägerdorf«. Zuletzt geprüft am: 19.07.2016.
http://www.holcim.de/fileadmin/templates/DE/doc/geocycle_flyer_rotor_k.pdf
- [Gleich-2008] Gleich, A. v.; Gößling-Reisemann, S. (2008): Industrial Ecology: Erfolgreiche Wege zu nachhaltigen industriellen Systemen ; [dieses Buch basiert auf einer Ringvorlesung an der Universität Bremen]. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden
- [Gleitsmann-1982] Gleitsmann, R. J. (1982): Die Haubergswirtschaft des Siegerlandes als Beispiel für ressourcenschonende Kreislaufwirtschaft. In: *Scripta Mercaturae*, (16), S. 21–54
- [Göllner-2012] Göllner, O. (19.11.2012): Neue Leiterplatte lässt Bauteile mit heißem Wasser lösen. Zuletzt geprüft am: 21.11.2016.
<http://www.heise.de/newsticker/meldung/Neue-Leiterplatte-laesst-Bauteile-mit-heissem-Wasser-loesen-1752666.html>
- [Goodyear-2010] Goodyear Dunlop (2010): Wissenswertes zum EU-Reifenlabel: Die neue Kennzeichnungspflicht für Kraftfahrzeugreifen
- [Goodyear-2016] Goodyear Dunlop (2016): How tyres are made: The manufacturing process. Zuletzt geprüft am: 22.11.2016.

- https://www.goodyear.eu/en_gb/consumer/learn/how-tires-are-made.html
- [Goodyear-2016] Goodyear Dunlop Tires Germany GmbH (2016): Vorstellung des EU-Reifenlabel: Das Externe Rollgeräusch. http://www.gdtg-rundumwissen.de/inhalt/eu-reifenlabel_vorstellung_externes-rollgeraeusch
- [Grimble-2013] Grimble, I.-P. (2013): Sachgerechte Demontage von Altanlagen. Zuletzt geprüft am: 21.11.2016. <http://www.windenergietage.de/WT%2022%201311%20F1%201650%20PSM%20Dr.%20Grimble.pdf>
- [Guezuraga-2012] Guezuraga, B.; Zauner, R.; Pölz, W. (2012): Life Cycle assessment of two different 2 MW class wind turbines. In: *Renewable Energy*, (37), S. 37–44
- [GWEC-2015] GWEC (2015): GLOBAL WIND REPORT: ANNUAL MARKET UPDATE 2015. Zuletzt geprüft am: 22.11.2016. http://www.gwec.net/wp-content/uploads/vip/GWEC-Global-Wind-2015-Report_April-2016_22_04.pdf
- [Haapala-2014] Haapala, K. R.; Prempreeda, P. (2014): Comparative life cycle assessment of 2.0 MW wind turbines. In: *International Journal of Sustainable Manufacturing*, 3(2), S. 170
- [Haas-2015] Haas, W.; Krausmann, F.; Wiedenhofer, D.; Heinz, M. (2015): How Circular is the Global Economy?: An Assessment of Material Flows, Waste Production, and Recycling in the European Union and the World in 2005. In: *Journal of Industrial Ecology*, 19(5), S. 765–777
- [Haberlag-2006] Haberlag, B.; Lüttig, A. K. (2006): Flüssigkristalle Seminararbeit. Zuletzt geprüft am: 01.06.2016. <http://www.pci.tu-bs.de/aggericke/PC5-Grenzfl/Fluessigkristalle.pdf>
- [Hauff-1987] Hauff, V. (1987): Unsere gemeinsame Zukunft. Greven [Federal Republic of Germany]: Eggenkamp Verlag
- [Hiebel-2015] Hiebel, M.; Nühlen, J.; Pfaum, H.; Janssen, W. (2016): Ressourcenschonung durch Recycling - Ergebnisse einer Analyse für die Kreislaufwirtschaft. In: Thomé-Kozmiensky, K.-J. (Hrsg.): *Recycling und Rohstoffe. Band 9*; 2016. Berlin: TK-Verlag, S. 71–85
- [Hinrichs-2013] Hinrichs, S. (2013): Sustainable Material Usage of Rotor Blades in Cement Plants. In: Pehlken, A. (Hrsg.): *Sustainable material life cycles - Is wind energy really sustainable?*; 2013. Oldenburg: BIS-Verl. der Carl-von-Ossietzky-Univ
- [HyRoS-2016] Universität Bremen (2016): HyRoS: Ein Verbundprojekt zur Rotorblattforschung. <http://www.hyros-projekt.de/>
- [IFAM-2006] Fraunhofer IFAM (2006): Entkleben auf Knopfdruck. Zuletzt geprüft am: 30.03.2017. http://www.ifam.fraunhofer.de/content/dam/ifam/de/documents/Klebstechnik_Oberflaechen/Klebstoffe_Polymerchemie/entkleben_knopfdruck_fraunhofer_ifam.pdf

- [IHK-2011] Industrie- und Handelskammer Nürnberg für Mittelfranken (2011): Adamec: Recycling-Anlage für Elektrogeräte. In: *Wirtschaft in Mittelfranken*, 2011(03), S. 59
- [IPH-2016] Institut für integrierte Produktions Hannover (2016): Ausgediente Windanlagen schnell, günstig und umweltfreundlich demontieren: Forscher aus Hannover erwarten Rückbau-Well in zehn Jahren und entwickeln Strategien. Zuletzt geprüft am: 20.07.2016. http://www.iph-hannover.de/_media/files/pressemitteilungen/IPH_Pressemitteilung_2016-03-02_Windpark-Demontage.pdf
- [Isenburg-2013] Isenburg, T.; Königsreuther, P. (2013): Rotorfertigung - Composites sorgen für mehr Strom mit weniger Windkraftanlagen. Zuletzt geprüft am: 17.11.2016. <http://www.maschinenmarkt.vogel.de/composites-sorgen-fuer-mehr-strom-mit-weniger-windkraftanlagen-a-418955/>
- [ISO-22628] ISO/DIS 22628:2001 (2001): Straßenfahrzeuge: Recyclingfähigkeit und Verwertbarkeit ; Berechnungsmethode (ISO/DIS 22628:2001) = Road vehicles, 2001. Aufl. Berlin: Beuth
- [ITAD-2015] ITAD (03.12.2015): EU- Kreislaufwirtschaftspaket – Hat sich das Warten gelohnt? Zuletzt geprüft am: 13.09.2016. https://www.itad.de/presse/presse/20151203_ITADPressemitteilung_Kreislaufwirtschaftspaket.pdf
- [IW-2016] Institut der Deutschen Wirtschaft (2016): Deutschland produziert zu viel Müll: IW-Nachricht. Zuletzt geprüft am: 21.12.2016. <http://www.iwkoeln.de/presse/iw-nachrichten/beitrag/siedlungsabfall-deutschland-produziert-zu-viel-muell-310721>
- [Jalapoor-2013] Jalapoor, D.; Rotter, V. S.; Götze, R. (2013): Einsatz und Rückgewinnungspotential von Indium in LCD Geräten. In: *Müll und Abfall*, (6), S. 312–319
- [Kaliszewski-2006] Kaliszewski, I. (2006): Soft computing for complex multiple criteria decision making. New York: Springer (International series in operations research & management science, 85)
- [Kannenbergs-2012] Kannenberg, A. (2012): Demontage von ENERCON Windenergieanlagen: Technische Beschreibung. Zuletzt geprüft am: 21.11.2016. <https://www.taunus-wind.de/fileadmin/Antrag/18%20Bauantrag,%20Bauvorlagen/18.12.1%20ENERCON%20Windenergieanlagen%20Demontage.pdf>
- [Kawohl-2011] Kawohl, C. (26.10.2011): Mutli-Metal Recycling bei der Aurubis AG. Berlin (Praxisdialog »Ressourcen- und materialeffiziente Produktgestaltung«. Datum: 26.10.2011)
- [Kloiber-2012] Kloiber, M. (11.09.2012): Programmwechsel auf dem Wertstoffhof: LCDs verdrängen allmählich Bildröhren beim Recycling. http://www.deutschlandfunk.de/programmwechsel-auf-dem-wertstoffhof.676.de.html?dram:article_id=220716
- [Krafzig-2016] Krafzig, S.; Kuhn, M.; Kroene, E.; Schlupeck, B. (16.11.2016): Die geteilte Produktverantwortung ist gescheitert. In: *320 Grad*, 2016. Untermeit-

- gen (2016). Zuletzt geprüft am: 18.11.2016. <http://320grad.de/die-geteilte-produktverantwortung-ist-gescheitert/>
- [Kranert-2013] Kranert, M.; Fischer, K.; Böhme, L.; Schetula, V. (15.11.2013): Rohstoffsicherheit in Baden-Württemberg - Abfälle aus Leuchtstoffröhren und Gasentladungslampen als Quelle von seltenen Erden. Stuttgart. Zuletzt geprüft am: 20.11.2016. http://www.iswa.uni-stuttgart.de/afw/lehrstuhl/downloads/Abschlussbericht_Leuchtstoffroehren12022014.pdf
- [Kreibich-1994] Kreibich, R. (1994): Ökologische Produktgestaltung und Kreislaufwirtschaft. In: *Umweltwirtschafts-Forum*, UWF 4, Heidelberg
- [KrW-/AbfG-1994] Deutscher Bundestag (1994): Bundesgesetzblatt, Teil 1, Nr. 66 vom 06.10.1994: Gesetz zur Vermeidung, Verwertung und Beseitigung von Abfällen. Zuletzt geprüft am: 22.11.2016. http://www.bgbl.de/xaver/bgbl/start.xav?startbk=Bundesanzeiger_BGBl&jump-To=bgbl194s2705.pdf#__bgbl__%2F%2F*%5B%40attr_id%3D%27bgbl194s2705.pdf%27%5D__1479378525461
- [KrWG-2012] Deutscher Bundestag (2012): Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (Kreislaufwirtschaftsgesetz - KrWG): KrWG. Zuletzt geprüft am: 29.07.2016. <http://www.gesetze-im-internet.de/krwg/BJNR021210012.html>
- [Kümmel-1990] Kümmel, R.; Papp, S. (1990): Umweltchemie: Eine Einführung, 2. Aufl. Leipzig: Dt. Verl. für Grundstoffindustrie
- [Kunert-2010] Kunert, O. (2010): Repowering - Chance mit Hindernissen. In: *Umwelt-Magazin*, 3, S. 38–40
- [Lamß-2015] Lamß, M. (2015): Umweltfreundlicher Strom mit Rotorblättern aus Metall
- [LCD-2016] Vertraulich (Oktober 2016): Experteninterviews LCD mit Erstbehandler/in und Sachverständiger/m. Sulzbach-Rosenberg
- [LUBW-2016] LUBW (11.08.2016): Von der Abfall- zur Ressourcenwirtschaft: Stoffliche Verwertung. Zuletzt geprüft am: 13.01.2017. <http://www4.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/24990/>
- [Lüers-2016a] Lüers, S. (2016): Status des Offshore-Windenergieausbaus in Deutschland: 1. Halbjahr 2016. Zuletzt geprüft am: 19.07.2016. https://www.windenergie.de/sites/default/files/download/publication/factsheet-status-des-offshore-windenergieausbaus-deutschland-1-halbjahr-2016/factsheet_status_offshore-windenergieausbau_halfjahr_2016_final.pdf
- [Lüers-2016b] Lüers, S. (2016): Status des Windenergieausbaus an Land in Deutschland: 1. Halbjahr 2016
- [Madlener-2011] Madlener, R.; Alcott, B. (2011): Herausforderungen für eine technisch-ökonomische Entkopplung von Naturverbrauch und Wirtschaftswachstum

- unter besonderer Berücksichtigung der Systematisierung von Rebound-Effekten und Problemverschiebungen: Ausarbeitung für die Enquete-Kommission »Wachstum, Wohlstand, Lebensqualität« des Deutschen Bundestages«. Berlin
- [Martínez-2009] Martínez, E.; Sanz, F.; Pellegrini, S.; Jiménez, E.; Blanco, J. (2009): Life cycle assessment of a multi-megawatt wind turbine. In: *Renewable Energy*, 34(3), S. 667–673
- [Martínez-2015] Martínez, E.; Blanco, J.; Jiménez, E.; Saenz-Diez, J. C.; Sanz, F. (2015): Comparative evaluation of life cycle impact assessment software tools through a wind turbine case study. In: *Renewable Energy*, 74, S. 237–246
- [Maurer-2016] Maurer, H. (2016): Das Kreislaufwirtschaftspaket der EU Kommission – Neue Impulse für die Kreislaufwirtschaft. In: *Müll und Abfall*, 6, S. 291–295
- [McKinsey-2013] McKinsey & Company (Hrsg.): NRW 2020 | Unser Land – unsere Zukunft, Studie. Düsseldorf
- [Meyer-2006] Meyer, U. I. (2006): Der philosophische Blick auf die Technik. Aachen: Ein-Fach-Verlag
- [Michelin-2016] Michelin Reifenwerke AG & Co. KGaA (2016): Technische Broschüre: Michelin Nutzfahrzeugreifen. Zuletzt geprüft am: 23.11.2016
- [Minami-2007] Minami, H.; Matsumoto, F.; Suzuki, S. (2007): Prospects of LCD Panel Fabrication and Inspection Equipment Amid Growing Demand for Increased Size. In: *Hitachi Review*, 56(3), S. 63–69
- [MWEIMH-2016] Ministerium für Wirtschaft, Energie, Industrie, Mittelstand und Handwerk NRW MWEIMH (Hrsg.): Potenzialanalyse einer zirkulären Wirtschaft im Land Nordrhein-Westfalen: Studie EPEA GmbH und Kienbaum. Düsseldorf
- [MWEIMH-2016] Scheelhaase, T.; Zinke, G. (2016): Bericht: Potenzialanalyse einer zirkulären Wertschöpfung im Land Nordrhein-Westfalen. Düsseldorf
- [Myhre-2012] Myhre, M.; Saiwari, S.; Dierkes, W.; Noordermeer, J. (2012): Rubber recycling: chemistry, processing, and applications: Rubber chemistry and technology, 85(3), S. 408–449 (85)
- [NABU-2015] NABU (02.12.2015): NABU kritisiert Kommissionsvorschläge für ein europäisches Kreislaufwirtschaftspaket. Berlin
- [Neitsch-2016] Matthias Neitsch (2016): EAG-Re-Use boomt Was nun? (Resource 2016)
- [Niederhausen-2014] Niederhausen, H.; Burkert, A. (2014): Elektrischer Strom: Gesteuerung, Übertragung, Verteilung, Speicherung und Nutzung elektrischer Energie im Kontext der Energiewende. Wiesbaden: Springer Vieweg (SpringerLink : Bücher)
- [Niemann-2016] Niemann, L. (2006): Energieamortisationszeit von Windkraftanlagen. Zuletzt geprüft am: 22.11.2016. http://www.buerger-fuer-technik.de/body_energieamortisation_wka.html
- [NMU-2011] Niedersächsisches Ministerium für Umwelt und Klimaschutz (Dezember 2011): Abschlussbericht des Arbeitskreises »Elektrogeräte und Produkt-

- verantwortung«. Hannover. Zuletzt geprüft am: 22.04.2016.
http://www.umwelt.niedersachsen.de/download/62954/Abschlussbericht_Elektrogeraete_und_Produktverantwortung.pdf
- [nokian-2016] nokian TYRES (2016): Production process. Zuletzt geprüft am: 22.11.2016. <https://www.nokiantyres.com/innovation/facts-about-tyres/production-process/>
- [Nordex-2011] Nordex (2011): Rückbauaufwand für Windenergieanlagen. Zuletzt geprüft am: 25.10.2016. https://www.kreis-due-ren.de/kreishaus/amt/66/oeffverfahren66/pdf/boslar/_Anlagenrueckbau_Gesamt.pdf
- [NRZ-2016] Neue Reifenzeitung (2016): Die größten Unternehmen der Reifenbranche 2015
- [Nühlen-2012] Nühlen, J. (2012): Einfluss kritischer Rohstoffe auf die Entwicklung der Windenergie in Deutschland: Eine branchenspezifische Analyse der Rohstoffsituation Masterarbeit. Aachen
- [Nunweiler-2016a] Nunweiler, E. (Mai 2016): Informationen zur Schadstoff- und Ressourcenrelevanz von Werkstoffen und Bauteilen von EAG: Zusammenstellung von Informationen zur Schadstoff- und Ressourcenrelevanz von Materialien und Bauteilen von EAG. Im Auftrag des Umweltbundesamtes. Dessau-Roßlau. Zuletzt geprüft am: 20.10.2016
- [Nunweiler-2016b] Nunweiler, E. (2.5.2016): Arbeitskreis EAG-Behandlungsanforderungen - AG 2 Bildschirmgeräte - TOP 3- Ausgangslage und Kenntnisstand (Nicht veröffentlicht). Dessau-Roßlau (AK BehandV Bildschirmgeräte)
- [OECD-2001] OECD (2001): Extended Producer Responsibility: A Guidance Manual for Governments. Paris: OECD Publishing
- [OECD-2014] OECD (2014): Nanotechnology and tyres: Greening industry and transport. Paris: OECD
- [Ortegon-2013] Ortegon, K.; Nies, L. F.; Sutherland, J. W. (2013): Preparing for end of service life of wind turbines. In: *Journal of Cleaner Production*, 39, S. 191–199
- [Övermöhle-2012] Övermöhle, K. (2012): Kurzanalyse des Marktes für Windkraftprojektierer in Deutschland 2012
- [Paech-2012] Paech, N. (2012): Nachhaltiges Wirtschaften jenseits von Innovationsorientierung und Wachstum: Eine unternehmensbezogene Transformationstheorie, 2. erw. u. bearb. Aufl. Marburg: Metropolis (Theorie der Unternehmung, 32)
- [Pearce-1990] Pearce, D. W.; Turner, R. K. (1990): Economics of natural resources and the environment. Baltimore: Johns Hopkins University Press
- [Pehlken-2004] Pehlken, A. (2004): Die Aufbereitung von Altreifen unter besonderer Berücksichtigung der Zerkleinerungstechnik: The processing of scrap tyres with focus on the comminution technology. In: *Aufbereitungstechnik* 45, 5, S. 37–46

- [Pehlken-2016] Pehlken, A. (28.06.2016): Rotorblätter und seine nahen Verwandten. Düsseldorf (VDI-Konferenz »Recycling von Kunststoffen und Verbundwerkstoffen«)
- [Pflaum-1998] Pflaum, H. (1998): Entwicklung der Modellstruktur für ein betriebliches Umweltinformationssystem (BUI) im Hinblick auf die Anwendung in der stoffverarbeitenden Industrie. Stuttgart: Fraunhofer-IRB-Verl. (UMSICHT-Schriftenreihe / Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik, UMSICHT, Bd. 9)
- [Poehlmann-1957] Poehlmann, H. (1957): Die Rationalisierung der industriellen Wasserwirtschaft, dargestellt am Beispiel der Eisenhütten. In: *Schweizerische Zeitschrift für Hydrologie*, 19(1), S. 88–93
- [Pomberger-2015] Pomberger, R. (2015): Die Zero Waste Initiative der EU - Motor oder Irrweg (1)
- [Prakash-2011] Prakash, S.; Brommer, E.; Gröger, J. (Dezember 2011): PROSA Computerbildschirme: Entwicklung der Vergabekriterien für ein klimaschutzbezogenes Umweltzeichen. Freiburg. Zuletzt geprüft am: 22.09.2016. <http://www.oeko.de/oekodoc/1347/2011-455-de.pdf>
- [Prakash-2015] Prakash, S.; Dehoust, G.; Gsell, M.; Schleicher, T.; Stamminger, R. (Februar 2015): Einfluss der Nutzungsdauer von Produkten auf ihre Umweltwirkung: Schaffung einer Informationsgrundlage und Entwicklung von Strategien gegen »Obsoleszenz«. Zwischenbericht: Analyse der Entwicklung der Lebens-, Nutzungs- und Verweildauer von ausgewählten Produktgruppen. Studie im Auftrag des Umweltbundesamtes. Dessau-Roßlau
- [Quitter-2016] Quitter, D. (2016): Leichte Rotorblätter aus Kunststoffschäumen. <http://www.konstruktionspraxis.vogel.de/leichte-rotorblaetter-aus-kunststoffschaeumen-a-553461/?cmp=nl-321&uuid=42AA78D2-D52A-41A4-A529-D665A6326703>
- [Rafique-2012] Rafique, R. M. U. (2012): Life Cycle Assessment of Waste Car Tyres: Master's Thesis in Innovative and Sustainable Chemical Engineering. Sweden
- [ReFibre ApS-2004] ReFibre ApS (2004): Recycling composite materials. Zuletzt geprüft am: 21.11.2016. <http://www.refiber.com/technology.html>
- [Reparatur-2016] Reparatur Revolution (2016): Neues Verbraucherschutzgesetz in Frankreich fördert langlebige Produkte und Reparatur. Zuletzt geprüft am: 26.01.2017. <http://www.reparatur-revolution.de/neues-verbraucherschutzgesetz-frankreich-foerdert-langlebige-produkte-und-reparatur/>
- [Reuter-2013] Reuter, M.; Oyj, O.; Hudson, C.; van Shaik, A.; Haiskanen, K.; Meskers, C.; Hagelüken, C. (April 2013): Metal Recycling: Opportunities, Limits, Infrastructure. Zuletzt geprüft am: 20.11.2016. http://www.unep.org/resourcepanel/portals/24102/pdfs/metal_recycling_full_report.pdf
- [rezulteo-2016] LIZEO ONLINE MEDIA GROUP (2016): Die Reifenherstellung. Zuletzt geprüft am: 22.11.2016. <http://www.rezulteo-reifen.de/autoreifen-guide/autoreifen-und-technologie/die-reifenherstellung-974>

- [Rohrig-2013] Rohrig, K. (2013): Windenergie Report Deutschland 2013. Zuletzt geprüft am: 22.08.2016. http://publica.fraunhofer.de/eprints/urn_nbn_de_0011-n-2837358.pdf
- [Rotter-2012] Rotter, V. S.; Flamme, S.; Ueberschaar, M.; Götze, R. (Hrsg.) (2012): Thermodynamische Herausforderung bei Recycling von Nebenmetallen. Berlin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky (Recycling und Rohstoffe, Band 5)
- [Rotter-2013] Rotter, V. S.; Ueberschaar, M.; Chancerel, P. (Hrsg.) (2013): Rückgewinnung von Spurenmetallen aus Elektroaltgeräten. Berlin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky (Recycling und Rohstoffe)
- [Rotter-2015] Rotter, V. S.; Geiping, J.; Ueberschaar, M.; Flamme, S. (Hrsg.) (2015): Anlagenbilanzierung als Bewertungsinstrument für ein Qualitätsrecycling von Elektroaltgeräten. Berlin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky (Recycling und Rohstoffe, Band 7)
- [RWI-2016] Rheinisch-Westfälisches Institut für Wirtschaftsforschung RWI (2016): Ländervergleich Nordrhein-Westfalen - Indikatoren der industriellen Entwicklung: Forschungsprojekt im Auftrag der FDP-Landtagsfraktion Nordrhein-Westfalen. Essen. Zuletzt geprüft am: 23.11.2016. http://www.rwi-essen.de/media/content/pages/publikationen/rwi-projektberichte/rwi-pb_laendervergleich_nrw_industr_entwicklung.pdf
- [Salhofer-2011] Salhofer, S.; Spitzbart, M.; Maurer, K. (2011): Recycling of LCD Screens in Europe - State of the Art and Challenges. In: Hesselbach, J.; Herrmann, C. (Hrsg.): *Glocalized Solutions for Sustainability in Manufacturing*. Proceedings of the 18th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering, Technische Universität Braunschweig, Braunschweig, Germany, May 2nd - 4th, 2011; 2011. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 454–458
- [Sayer-2015a] Sayer, F. (2015a): LENA: Lebensdauererhöhung und Leichtbauoptimierung durch nanomodifizierte und hybride Werkstoffsysteme im Rotorblatt. <http://www.windenergie.iwes.fraunhofer.de/de/forschungsprojekte/aktuelle-projekte/lenah.html>
- [Sayer-2015b] Sayer, F. (2015b): Einführung von Komponententests als Teil der Entwicklung und Zertifizierung von Rotorblättern für Windenergieanlagen. Zuletzt geprüft am: 27.10.2016. <http://www.windenergie.iwes.fraunhofer.de/de/forschungsprojekte/aktuelle-projekte/kompzert.html>
- [Schaffartzik-2014] Schaffartzik, A.; Mayer, A.; Gingrich, S.; Eisenmenger, N.; Loy, C.; Krausmann, F. (2014): The global metabolic transition: Regional patterns and trends of global material flows, 1950-2010. In: *Global environmental change : human and policy dimensions*, 26, S. 87–97
- [Scheiring-2015] Scheiring, T. (K. (2015): Overview LCD Recovery Processes. Präsentation vom 13. Mai 2015: Nicht veröffentlicht.

- [Schmidinger-2012] Schmidinger, K.; Stehfest, E. (2012): Including CO₂ implications of land occupation in LCAs—method and example for livestock products. In: *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 17(8), S. 962–972
- [Schmidt-1995] Schmidt, M.; Schorb, A. (1995): Stoffstromanalysen: In Ökobilanzen und Öko-Audits. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg
- [Schnepel-2016] Schnepel, C. (2.5.2016): Einfluss der Erfassung von Bildschirmgeräten auf ihre Behandlung (nicht veröffentlicht). Dessau-Roßlau (AK BehandV Bildschirmgeräte)
- [Seiler-2014] Seiler, E.; Teipel, U. (2014): Recycling von Kompositbauteilen aus Kunststoffen als Matrixmaterial. Zuletzt geprüft am: 24.11.2016.
http://www.forcycle.de/sites/default/files/stand/kompositbauteile_stand_3_12_2014.pdf
- [Sellin-2016] Sellin, G.; Fröhlich, H.; Rasenack, K. (2016): InAccess – Rückgewinnung von Indium durch effizientes Recycling von LCD Bildschirmen. In: Thomé-Kozmiensky, K.-J. (Hrsg.): *Recycling und Rohstoffe. Band 9*; 2016. Berlin: TK-Verlag, S. 163–176
- [Siemens-2012] Siemens (2012): Factsheet: B75 RotorblattSiemens AG / Energy Sector
- [Sienkiewicz-2012] Sienkiewicz, M.; Kucinska-Lipka, J.; Janik, H.; Balas, A. (2012): Progress in used tyres management in the European Union: a review. In: *Waste management (New York, N.Y.)*, 32(10), S. 1742–1751
- [Socolof-2011] Socolof, M. L.; Overly, J. G.; Kincaid, L. E.; Geibing, J. R. (Dezember 2011): Life-Cycle Assessment of Desktop Computer Displays: Summary of Results
- [SPON-2016] SPON-2016: Gegen Wegwerfmentalität: Schweden senkt Steuern auf Reparaturen. Zuletzt geprüft am: 27.11.2016.
<http://www.spiegel.de/wirtschaft/soziales/schweden-senkt-steuern-auf-reparaturen-a-1123262.html>
- [Stahel-1982] Stahel, W. R. (1982): The product life factor. An Inquiry into the Nature of Sustainable Societies: The Role of the Private Sector (Series: 1982 Mitchell Prize Papers), NARC.
- [Stahel-1991] Stahel, W. R. (1991): Langlebigkeit und Materialrecycling: Strategien zur Vermeidung von Abfällen im Bereich der Produkte. Essen: Vulkan-Verlag
- [Statista-2016] Statista GmbH (2016): Marktanteile der führenden Hersteller am Absatz von PC-Monitoren weltweit vom 1. Quartal 2012 bis zum 1. Quartal 2016. Hamburg
- [Stiftung EAR-2016a] Stiftung Elektro-Altgeräte Register (2016): Verzeichnis der Sammel- und Rücknahmestellen. Zuletzt geprüft am: 19.11.2016. <https://www.ear-system.de/ear-verzeichnis/sammel-und-ruecknahmestellen>
- [Stiftung EAR-2016b] Stiftung Elektro-Altgeräte Register (2016): Verzeichnis der Betreiber von Erstbehandlungsanlagen. Zuletzt geprüft am: 19.11.2016. <https://www.ear-system.de/ear-verzeichnis/eba>

- [StVZO-2012] Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz (2012): Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung. http://www.gesetze-im-internet.de/stvzo_2012/
- [Superuse-2016] Superuse Studios (2015): Blade Made. <https://issuu.com/2012architecten/docs/blademade>
- [TCO-2015] TCO Development AB (2015): TCO Certified Displays 7.0. Zuletzt geprüft am: 21.11.2016. <http://tcodevelopment.com/files/2015/11/TCO-Certified-Displays-7.0.pdf>
- [UBA-2011] Umweltbundesamt (2011): Karzinogene, mutagene, reproduktionstoxische (CMR) und andere problematische Stoffe in Produkten: Identifikation relevanter Stoffe und Erzeugnisse, Überprüfung durch Messungen, Regelungsbedarf im Chemikalienrecht. Zuletzt geprüft am: 23.01.2017. <http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/461/publikationen/4092.pdf>
- [UBA-2014] Umweltbundesamt (2014): Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050: Climate Change
- [UBA-2015] Umweltbundesamt (2015): Recycling von Edel- und Sondermetallen: Koordiniertes Handeln ist nötig: Konkrete Schritte zur Stärkung des Recyclings für mehr Umweltschutz und mehr Versorgungssicherheit sind gefragt – bei allen Akteuren. <http://www.umweltbundesamt.de/presse/presseinformationen/recycling-von-edel-sondermetallen-koordiniertes>
- [UBA-2016a] Malkwitz, A.; Karl, C.; Leckinghaus, I.; Bhar, R.; Scheepmaakers, J.; Uhe, D.; Schmincke, E. (2016): Ressourcenschonung durch Produktkennzeichnung für Bauprodukte: Erstellung eines Kriterienkatalogs für die Stufeneinteilung von Bauprodukten in der Normung. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte_38_2014_ressourcenschonung_durch_produktkennzeichnung_fuer_bauprodukte.pdf
- [UBA-2016b] Umweltbundesamt (2016): Bildschirme und Lampen. Dessau-Roßlau. Zuletzt geprüft am: 02.06.2016. <http://www.umweltbundesamt.de/daten/abfall-kreislaufwirtschaft/entsorgung-verwertung-ausgewaehlter-abfallarten/bildschirme-lampen>
- [UNEP-2006] United Nations Environmental Programme (2006): Circular Economy: An alternative model for economic development. Kenia. Zuletzt geprüft am: 29.09.2016. http://www.unep.org/chinese/documents/final_circulareconomy_whole.doc.pdf
- [UNEP-2011] UNEP; International Panel for Sustainable Resource Management (2011): Draft Glossary of Terms used by the International Resource Panel. http://www.unep.org/resourcepanel/Portals/50244/documents/IRP_Draft_Glossary.pdf

- [UNEP-2012] United Nations Environmental Programme (2012): Sustainable Consumption and Production.
<http://www.unep.org/rio20/About/SustainableConsumptionandProduction/tabid/102187/Default.aspx>
- [UNEP-2016] United Nations Environmental Programme (2016): Global Material Flows and Resource Productivity: An Assessment Study of the UNEP International Resource Panel. Paris
- [Vargas-2015] Vargas, A. V.; Zenón, E.; Oswald, U.; Islas, J. M.; Güereca, L. P.; Manzini, F. L. (2015): Life cycle assessment: A case study of two wind turbines used in Mexico. In: *Applied Thermal Engineering*, 75, S. 1210–1216
- [VCI-2015] VCI (02.12.2015): Langer Weg zur Kreislaufwirtschaft. Zuletzt geprüft am: 13.09.2016. <https://www.vci.de/langfassungen/langfassungen-pdf/2015-12-02-langer-weg-zur-kreislaufwirtschaft.pdf>
- [VCI-2016] Verband der chemischen Industrie e.V. (2016): Rohstoffbasis der chemischen Industrie: Daten und Fakten. Zuletzt geprüft am: 23.01.2017. <https://www.vci.de/vci/downloads-vci/top-thema/daten-fakten-rohstoffbasis-der-chemischen-industrie-de.pdf>
- [VDI-2014] VDI (2014): Ressourceneffizienz von WindenergieanlagenZentrum für Ressourceneffizienz ZRE. Zuletzt geprüft am: 22.08.2016.
http://www.ressource-deutschland.de/fileadmin/user_upload/downloads/kurzanalysen/2014-Kurzanalyse-VDI-ZRE-09-Ressourceneffizienz-Windenergieanlagen.pdf
- [VDI-2015] Verein Deutscher Ingenieure (2015): BMBF-Foresight-Berichte: So sieht die Welt im Jahr 2030 aus. <http://www.vditz.de/meldung/bmbf-foresight-berichte-so-sieht-die-welt-im-jahr-2030-aus/>
- [VDI-3780] Verein Deutscher Ingenieure (2000): Technikbewertung Begriffe und Grundlagen: VDI-Richtlinien. Beuth Verlag, Berlin
- [VDI-4800] Verein Deutscher Ingenieure (2014): Ressourceneffizienz: Methodische Grundlagen, Prinzipien und Strategien, 2014. Aufl. Berlin: Beuth (VDI-Richtlinien, 4800,1,E)
- [VDIN-2014] Verein Deutscher Ingenieure (2014): VDI Nachrichten: Wertstoffbranche sucht Alternativen zum dualen System. In: *Technik & Gesellschaft*, (26), 5, Berlin
- [VEE Sachsen-2011] VEE Sachsen (2011): Rechtliche, standörtliche und naturschutzrelevante Rahmenbedingungen eines Repowering-Szenarios der sächsischen Windenergienutzung für die Stromerzeugung bis 2020
- [VerpackV-1991] Deutscher Bundestag (1991): Bundesgesetzblatt, Teil 1, Nr. 36 vom 20.06.1991: Verordnung über die Vermeidung von Verpackungsabfällen (Verpackungsverordnung - VerpackV). Zuletzt geprüft am: 17.11.2016.
http://www.bgbl.de/xaver/bgbl/start.xav?startbk=Bundesanzeiger_BGBl&jump-To=bgbl191s1234.pdf#__bgbl__%2F%2F*%5B%40attr_id%3D%27bgbl191s1234.pdf%27%5D__1479381409878

- [VKU-2016] VKU (22.02.2016): VKU positioniert sich zum europäischen Kreislaufwirtschaftspaket. Zuletzt geprüft am: 13.09.2016.
<http://www.vku.de/bruessel/newsletter-ge/2016-februar/vku-positioniert-sich-zum-europaeischen-kreislaufwirtschaftspaket.html?p=1>
- [Wagner-2004] Wagner, H. (2004): Energy yield ratio and cumulative energy demand for wind energy converters. In: *Energy*, 29(12-15), S. 2289–2295
- [Ware-2015] Ware, P. S. (2015): Pyrolysis of waste tyres and future. In: *Chemistry & Biology*, 1(1)
- [WBCSD-2007] World Business Council for Sustainable Development (2007): Tire: Industry project. Zuletzt geprüft am: 04.08.2016.
http://wbcsdserver.org/wbcsdpublications/cd_files/datas/business-solutions/tire/pdf/TireIndustryProject.pdf
- [wdk-2013] Hirsch, H.; Drechsler, H. J. (28.06.2013): Altreifenverwertung in Deutschland: Fachgespräch Verwertung von Altreifen Umweltbundesamt. Berlin. Zuletzt geprüft am: 23.11.2016
- [wdk-2015] Wirtschaftsverband der deutschen Kautschukindustrie e.V. (2015): Die Kautschukindustrie: 2015. Frankfurt am Main
- [WEF-2016] World Economic Forum (2016): The New Plastics Economy: Rethinking the future of plastics
- [Weller-2016] Weller, K. (2016): Rotorblattfertigung: »Die Industrie wird erwachsen«. In: *Branchenportal Windindustrie in Deutschland*
- [WETI-2015] Faber, T.; Borrmann, R.; Hoyer, N. (2015): Vom Baum zum Blatt. In: *Erneuerbare Energien*
- [Wilts-2014] Wilts, H.; Lucas, R.; Gries, N. von; Zirngiebl, M. (2014): Recycling in Deutschland – Status quo, Potenziale, Hemmnisse und Lösungsansätze. Wuppertal. Zuletzt geprüft am: 10.10.2016
- [Windguard-2015] Deutsche Windguard (2015): Anzahl der Windenergieanlagen in Deutschland - Stand 31.12.2015. Zuletzt geprüft am: 02.12.2016.
<https://www.wind-energie.de/infocenter/statistiken/deutschland/windenergieanlagen-deutschland>
- [Windmonitor-2016] Windmonitor (2016): Entwicklung der Anlagendimensionen. Zuletzt geprüft am: 24.11.2016.
http://www.windmonitor.de/windmonitor_de/bilder_javascript.html?db_communicate='Windenergieeinspeisung.daten'&p_lang=ger&img_id=427
- [Witten-2016] Witten, E.; Schuster, A. (2016): Der Composites-Markt Europa: Marktentwicklungen, Herausforderungen und Chancen
- [Woidasky-2013] Woidasky, J. (2013): Weiterentwicklung des Recyclings von faserverstärkten Verbunden Recycling und Rohstoffkonferenz 2013. In: Thomé-Kozmiensky, K.-J.; Goldmann, D. (Hrsg.): *Recycling und Rohstoffe*; 2013, S. 241–260
- [Woidasky-2013a] Woidasky, J.; Seiler, E. (05.-06.02.2013): Recycling von Windkraftanlagen: Wertstoff Elektroschrott. Hamburg (Hamburg T.R.E.N.D.)

- [WupperInst-2015] Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH (2015): Wege zu einer weitgehenden Dekarbonisierung Deutschlands: Kurzfassung
- [WVMetalle-2016] WVMetalle (Mai 2016): Umfangreicher Aktionsplan und Legislativpaket liegen auf dem Tisch. Berlin. Zuletzt geprüft am: 13.09.2016.
<http://metalleproklima.de/wp-content/uploads/2016/04/Zweiseiter-zum-Kreislaufwirtschaftspaket.pdf>
- [WWF-2012] WWF Deutschland (2012): Klimawandel auf dem Teller: Ernährung, Nahrungsmittelverluste, Klimawirkung. Berlin
- [Yang-2015] Yang, L.; Sáez, E. R.; Nagel, U.; Thomason, J. L. (2015): Can thermally degraded glass fibre be regenerated for closed-loop recycling of thermosetting composites? In: *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 72, S. 167–174
- [Yuan-2006] Yuan, Z.; Bi, J.; Moriguchi, Y. (2006): The Circular Economy: A New Development Strategy in China. In: *Journal of Industrial Ecology*, 10(1-2), S. 4–8
- [Zahn-1996] Zahn, E.; Dogan, D. (1996): Umweltschutz im Wertschöpfungssystem. In: Eyerer, P. (Hrsg.): *Ganzheitliche Bilanzierung*. Werkzeug zum Planen und Wirtschaften in Kreisläufen; 1996. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 48–64
- [ZDH-2016] ZDH (März 2016): EU-Kreislaufwirtschaftspaket. Berlin. Zuletzt geprüft am: 13.09.2016.
https://www.zdh.de/fileadmin/user_upload/themen/Handwerkspolitik/zdh-kompakt/zdh_kompakt_2016/EU-Kreislaufwirtschaftspaket.pdf
- [Zimmermann-2011] Zimmermann, T.; Gößling-Reisemann, S. (2011): Optimal repowering of wind energy converters: energy demand and CO2 intensity as indicators. Zuletzt geprüft am: 17.11.2016.
www.lcm2011.org/papers.html?file=tl_files/pdf/poster/day2/Zimmermann-Optimal_repowering_of_wind_energy_converters-601_b.pdf
- [ZVEI-2016] ZVEI (Januar 2016): Stellungnahme - Das europäische Kreislaufwirtschaftspaket. Frankfurt. Zuletzt geprüft am: 13.09.2016.
<http://www.zvei.org/Publikationen/ZVEI-Stellungnahme-%20europaeische%20Kreislaufwirtschaftspaket.pdf>