

Kreislaufwirtschaft und Ressourceneffizienz am Beispiel der Automobilität



Impressum

Kreislaufwirtschaft und Ressourceneffizienz am Beispiel der Automobilität

ERSTELLT IM AUFTRAG VON
Stiftung Arbeit und Umwelt der IGBCE

- Inselstr. 6, 10179 Berlin
- Königsworther Platz 6, 30167 Hannover

AUTOR
Prof. Dr. Henning Wilts,
Abteilungsleiter Kreislaufwirtschaft,
Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH

PROJEKTLEITUNG
Carola Dittmann, Stiftung Arbeit und Umwelt der IGBCE

LEKTORAT
Gisela Lehmeier, FEINSCHLIFF

SATZ UND LAYOUT
navos – Public Dialogue Consultants GmbH

TITELBILD
navos – Public Dialogue Consultants GmbH

VERÖFFENTLICHUNG
Juni 2023

BITTE ZITIEREN ALS
Stiftung Arbeit und Umwelt der IGBCE (2023):
Kreislaufwirtschaft und Ressourceneffizienz am Beispiel der Automobilität. Berlin.

Vorwort

Aus der Linie einen Kreis zu machen, das ist eine der Transformationsaufgaben des nächsten Jahrzehnts. Wertschöpfungsprozesse müssen ressourcen- und klimaschonender ausgerichtet werden. Nur mit einer tiefgehenden Transformation von Produktionsketten und Konsummustern kann das noch immer vorherrschende lineare System „produzieren – nutzen – wegwerfen“ durch einen Wertschöpfungskreislauf ersetzt werden.

Kreislaufwirtschaft ist nicht neu. In der Vergangenheit war damit jedoch vor allem das Trennen, Entsorgen und Recyceln von Abfall gemeint. Wenn wir heute von Kreislaufwirtschaft sprechen, denken wir an eine zirkuläre Wirtschaft (Circular Economy), die das gesamte Wirtschaftssystem im Fokus hat.

Zirkuläres Wirtschaften setzt auf allen Ebenen des bisherigen linearen Systems an: Es sollen möglichst wenig Rohstoffe verbraucht werden, die Produkte sollen auf Langlebigkeit, Reparierbarkeit und Wiederverwertbarkeit ausgelegt sein. Ihre Nutzung soll zudem möglichst effizient sein, etwa durch den Sharing-Economy-Ansatz. Für das Ende der Kette müssen umfassende Recyclingsysteme aufgebaut werden, um den Abfall wiederzuverwerten.

Eine Transformation der Wirtschaft durch zirkuläres Wirtschaften steht trotz zielführender technischer Fortschritte bisher nicht ausreichend im Fokus. Damit sich das ändert, ist es entscheidend, ein besseres Verständnis zu fördern und das Bewusstsein für die Chancen und Herausforderungen des Übergangs zur Kreislaufwirtschaft zu schärfen.

Was konkret bedeutet Kreislaufwirtschaft, welche Ansätze gibt es aktuell, was hemmt die Entwicklung? Wie wird sich der Übergang jetzt und in Zukunft auf die Arbeitsmärkte auswirken und welche Qualifikationsbedarfe werden entstehen? Welche industriellen Systeme müssen neu entworfen werden, wie ist die mehrfache Verwendung von Materialien und Abfällen zu fördern?

Diesen und weiteren Fragen sind wir am Beispiel der Automobilität nachgegangen. Die Automobilindustrie ist einer der bedeutendsten Wirtschaftszweige in Deutschland. Die nötige Transformation der Produktionsprozesse und der Wandel zur Elektromobilität setzen die Branche jedoch extrem unter Druck.

Wir haben eine Reihe von Hebeln analysiert – vom Produktdesign über Geschäftsmodelle und Nutzung bis hin zum Recycling. Viele Potenziale werden noch nicht ausgeschöpft. Politisch und regulatorisch müssen weitere Stellschrauben angezogen werden, um die Transformation zu einer automobilen Kreislaufwirtschaft zu beschleunigen. Die gerade in Entwicklung befindliche nationale Kreislaufstrategie kann hier wichtige Impulse setzen. Wir werden den Prozess weiterverfolgen und uns konstruktiv einbringen.

Wir freuen uns auf den Austausch!

Carola Dittmann

Bereichsleiterin Nachhaltigkeit/CSR und Mitbestimmung

Inhalt

Vorwort	3
1 Einleitung, Scope und Analyserahmen	6
1.1 Hintergrund und Ausgangslage	6
1.2 Spezifische Herausforderungen für den Automobil-Sektor	8
2 Hebel der Kreislaufwirtschaft entlang der Wertschöpfungskette Automobil	10
2.1 Kreislaufhebel im Bereich Kunststoffe	11
2.1.1 Einsatz von Kunststoff-Rezyklat	11
2.1.2 Kunststoff – mechanisches Recycling	14
2.1.3 Chemisches Kunststoff-Recycling	16
2.1.4 Biobasierte Kunststoffe	18
2.1.5 Leichtbau unter anderem durch Kunststoffeinsatz	19
2.2 Kreislaufhebel im Bereich Metalle	20
2.2.1 Closed-Loop-Recycling	20
2.2.2 Rezyklatanteile	20
2.3 Batterien	21
2.3.1 Recycling von Traktionsbatterien	21
2.3.2 2nd use für Traktionsbatterien	22
2.3.3 Refabrikation von Batterien	24
2.4 Reifen und Elektronikkomponenten	25
2.4.1 Einsatz biobasierter Alternativmaterialien zum synthetischen Kautschuk	25
2.4.2 Vertiefte Demontage von Elektronikkomponenten	26
2.5 Neue Nutzungsformen	27
2.5.1 Carsharing	28
2.5.2 Intermodale Mobilität	29
3 Analyse regulatorischer Rahmen der Kreislaufwirtschaft für den Automobilsektor	31
3.1 Regulatorischer Rahmen zur Kreislaufwirtschaft im Automobilsektor	31
3.2 Identifikation der zentralen regulatorischen Hemmnisse	32
3.2.1 Intransparenz der eingesetzten Rohstoffe	33
3.2.2 Input-basierte Recyclingquoten setzen begrenzte Anreize für hochwertiges Recycling	33
3.2.3 Fehlende Qualitätsstandards speziell für Kunststoffrezyklate	34
3.2.4 Herstellerverantwortung bezieht sich nur auf in der EU verbleibende Fahrzeuge	35
3.2.5 Abgrenzung Gebrauchtwagen/Altfahrzeug – Struktur der Rücknahme in Deutschland	36
3.3. Instrumente zur Unterstützung der Zirkularität in der Wertschöpfungskette Automobil	37
3.3.1 Vorgaben zur Recyclingfähigkeit von Fahrzeugen zum gegebenen Stand der Recyclinginfrastruktur	37
3.3.2 Digitale Produktpässe als Enabler hochwertig geschlossener Stoffkreisläufe	37
3.3.3 Mindestrezyklatquoten für Sekundärkunststoffe	38
3.3.4 System globaler Herstellerverantwortung inklusive auf Massebilanzen basierender Vorgaben zur Schließung einzelner Stoffkreisläufe	39
3.3.5 Optimierung der Sammellogistik für zentrale „circular workshops“ (Vorbild Renault)	39
4 Mögliche Effekte auf die Wertschöpfungskette Automobilität	41
4.1 Potenzielle Veränderungen der Wertschöpfung	41
4.2 Arbeitsplatzeffekte und Qualifikationsbedarfen	42
5 Kerneergebnisse und Ausblick	45
Literaturverzeichnis	46

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Kreislaufwirtschaftsquote (CMU) ausgewählter EU-Länder	7
Abbildung 2:	EU-Aktionsrahmen zur Beschleunigung der Kreislaufwirtschaft in der Automobilindustrie	9
Abbildung 3:	Übersicht ausgewählter Kreislaufwirtschafts-Hebel in TRL 8 und 9	10
Abbildung 4:	CO ₂ -Einsparungen durch den Einsatz von Kunststoffzyklat	12
Abbildung 5:	Kunststoffzyklatanteile in Deutschland	13
Abbildung 6:	Preisentwicklung von recyceltem PET im Vergleich zu Neuware	14
Abbildung 7:	Ökobilanzielle Bewertung verschiedener PET-Produktionsverfahren	17
Abbildung 8:	Szenario mit extrem hohem Anteil an Batterien in einer Zweitnutzung	24
Abbildung 9:	Ablauf der Altfahrzeugbehandlung und Einbettung der Separation der Fahrzeugelektronik	27
Abbildung 10:	Material- und Treibhausgasintensitäten für vereinzelte Verkehrsmittel	28
Abbildung 11:	Altfahrzeug-Verwertungsquoten Deutschland 2010 bis 2019	34
Abbildung 12:	Verbleib der endgültig stillgelegten Fahrzeuge in Deutschland 2019	36
Abbildung 13:	Anwendungsfälle im Rahmen von Catena X entlang der Wertschöpfungskette	38
Abbildung 14:	Handlungsfelder einer industriellen Fahrzeugverwertung	40
Abbildung 15:	Auswirkungen auf die Beschäftigung in der EU in den Szenarien der Kreislaufwirtschaft	43
Abbildung 16:	Prozentuale Veränderungen des BIP im Vergleich verschiedener Kreislaufwirtschafts-Modellierungen	44
Abbildung 17:	Ansatzpunkte zur Transformation in Richtung Kreislaufwirtschaft	45

1

1. Einleitung, Scope und Analyserahmen

1.1 Hintergrund und Ausgangslage

Die größten Herausforderungen für Wissenschaft, Wirtschaft, Politik und Gesellschaft sind gegenwärtig ein nachhaltiger Umgang mit natürlichen Ressourcen und die Begrenzung der Erderwärmung auf deutlich unter 2 Grad. Global steigt die Ressourcennutzung weiterhin dramatisch an: Zwischen 1970 und 2017 wuchs sie um mehr als das Dreifache.¹ Für die Zukunft wird ein weiterer Anstieg prognostiziert, vor allem aufgrund der stetigen Zunahme der globalen Bevölkerung und der gleichzeitig unveränderten Konsummuster. Die globale Ressourcengewinnung beschleunigte sich in den vergangenen 50 Jahren exponentiell.² Nach Angaben des International Resource Panel wurde im Jahr 2021 erstmals die Grenze von 100 Milliarden Tonnen globale Materialextraktion aus der Umwelt überschritten, damit wurde mehr als viermal so viel wie 1970 verbraucht.³ Die Umweltprobleme nehmen zu und werden komplexer. Neben Ressourcenverbrauch und Erderwärmung gilt das auch für Problematiken wie Biodiversitätsverlust und Landnutzungsänderungen.

Das hat Auswirkungen auf die Wirtschaftsstandorte Deutschland und Europa: Die Lieferketten werden unsicher, die Rohstoffe knapper (Europa ist ein in vielen Bereichen rohstoffarmer Kontinent), die Preise steigen und der öffentliche Druck gegen Ressourcenverschwendung und Abfallaufkommen nimmt zu. All diese Entwicklungen bedrohen den Industriestandort Deutschland, seine Wertschöpfung und seine Arbeitsplätze.

Als Lösungsansatz wird eine Entkopplung des Ressourcenverbrauchs von der wirtschaftlichen Entwicklung beziehungsweise von der Entwicklung des Wohlstands angesehen. Eine Strategie zur Erreichung dieses Ziels ist beispielsweise die Steigerung der Ressourceneffizienz durch die Transformation zur Kreislaufwirtschaft (Circular Economy, CE)⁴, welche sich in den vergangenen Jahren immer stärker etabliert hat. Die überwiegend lineare Wirtschaftsweise und das damit verbundene enorme Abfallaufkommen stellen Volkswirtschaften weltweit

vor massive Herausforderungen, weshalb der Übergang in eine Kreislaufwirtschaft stärker forciert wird als jemals zuvor. Auf europäischer Ebene hat die Europäische Kommission mit dem Green Deal und dem dort verankerten Circular Economy Action Plan einen strategischen Rahmen gesetzt, der sowohl die ökologischen als auch die sozio-ökonomischen Notwendigkeiten und potenziellen Vorteile einer Circular Economy betont. Mit dem „Programm zur nachhaltigen Nutzung und zum Schutz der natürlichen Ressourcen für Deutschland“ (ProgRes) wurde das Thema auf politischer Ebene in Deutschland bereits sehr früh verankert (vgl. Kapitel 3 zu den politischen/regulatorischen Rahmenbedingungen).

Eine Leitlinie in dem Programm behandelt das Ziel, die „Wirtschafts- und Produktionsweisen in Deutschland schrittweise von Primärrohstoffen unabhängiger zu machen, die Kreislaufwirtschaft weiterzuentwickeln und auszubauen“. Allgemein wird das Konzept der Kreislaufwirtschaft als eine wesentliche Strategie angesehen, den Rohstoff- und Ressourcenverbrauch wirksam zu senken. Das geht über Recycling hinaus, denn Materialien sollen länger im Wirtschaftszyklus gehalten werden, unter anderem durch Reparatur sowie Wieder- und Weiterverwendung. Auf europäischer Ebene begann die Politik mit verschiedenen Aktivitäten zur Umsetzung des Circular Economy Action Plans, auf nationaler Ebene mit Gesetzen wie dem Kreislaufwirtschaftsgesetz, dem Abfallvermeidungsprogramm oder dem jetzt gestarteten Prozess zur Entwicklung einer nationalen Kreislaufwirtschaftsstrategie. Damit sollen Rahmenbedingungen für eine umfassende Kreislaufwirtschaft geschaffen werden, die über die zuvor bestehenden isolierten Ansätze zur Verbesserung der Abfallwirtschaft, des Umweltmanagements in Unternehmen und anderes hinausgehen.

¹ IRP 2022.

² Steffen et al. 2015.

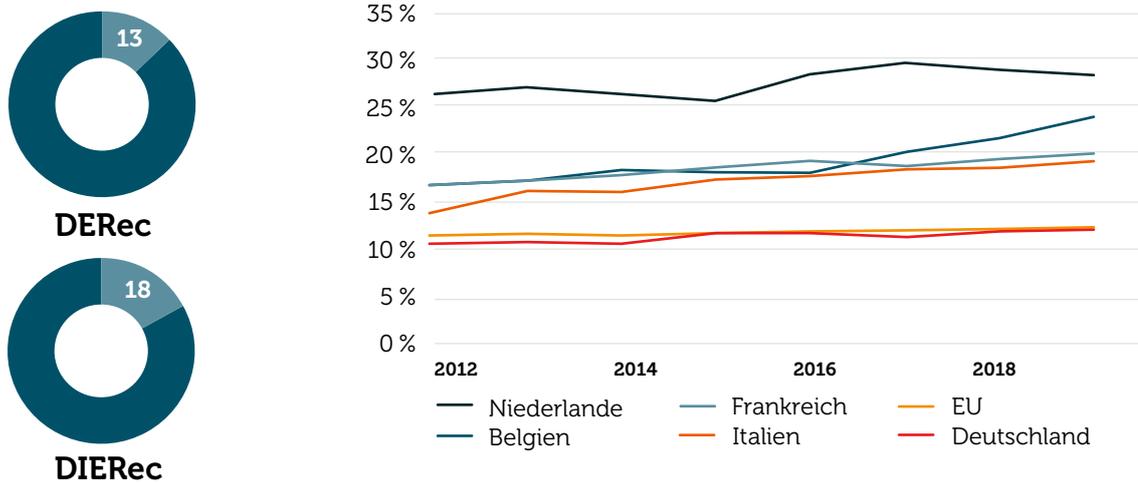
³ Bringezu et al. 2017.

⁴ Der Begriff der Kreislaufwirtschaft wird in Deutschland häufig sehr begrenzt auf die Abfallwirtschaft verstanden, umfasst hier aber das gesamte Denken in geschlossenen Stoffkreisläufen: vom Produktdesign über Geschäftsmodelle bis hin zum Wiedereinsatz von Sekundärrohstoffen nach entsprechenden Aufbereitungsschritten.

Diese häufig parallelen und teilweise unkoordinierten Maßnahmen reichten bislang nicht für eine umfassende Transformation zur Kreislaufwirtschaft: Abbildung 1 zeigt, dass zum Beispiel die zirkuläre Materialnutzungsrate (engl. Circular Material Use Rate), also der Anteil recycelter Materialien in der einheimischen Industrie – einer

der Kernindikatoren der Europäischen Kommission zur Kreislaufwirtschaft in Deutschland – seit knapp einem Jahrzehnt mehr oder weniger stagniert. Länder wie die Niederlande haben sich hier als globale Vorreiter positioniert.

Abbildung 1: Kreislaufwirtschaftsquote (CMU) ausgewählter EU-Länder



Die **Ressourceneinsparung** durch den Einsatz von Sekundärrohstoffen liegt zwischen 13 % (DIERec) und 18 % (DIERec, einschließlich globaler Vorketten).

Im **EU-Vergleich liegt Deutschland** trotz eines moderaten Anstiegs der Kreislaufwirtschaftsquote immer noch **unter dem Durchschnittswert** aller EU-Länder.

Quelle: CEID 2021, eigene Übersetzung

Diese Entwicklung ist insofern erstaunlich, als es nicht an Modellierungen oder Abschätzungen mangelt, die auf die massiven Kostensenkungspotenziale und Geschäftsfeldpotenziale der Kreislaufwirtschaft verweisen. Die Europäische Kommission erwartet alleine durch die Umsetzung ihres Aktionsplans Kreislaufwirtschaft eine jährliche Steigerung des BIPs von 80 Milliarden Euro und 700.000 neue Arbeitsplätze.⁵

und bietet damit die seltene Möglichkeit, das Konzept der Kreislaufwirtschaft in Investitionsentscheidungen zu integrieren. Gleichzeitig stellt sich hier in besonderer Weise die Frage, wer zu den Gewinnern und wer zu den Verlierern der Kreislaufwirtschaft gehören wird. Dieser Aspekt wird bislang kaum diskutiert, wird aber umso drängender, je konkreter Veränderungen von Wertschöpfungsketten betrachtet werden.

Die Kernfragen lauten daher: Wieso scheinen ökonomische Anreize in solchen Dimensionen bislang noch nicht auszureichen? Und welche konkreten Hemmnisse stehen der Kreislaufwirtschaft entgegen? Um sie zu beantworten, ist es zwingend nötig, von der Metaebene der Kreislaufwirtschaft auf konkrete Wertschöpfungsketten zu blicken: Wie könnte Kreislaufwirtschaft dort aussehen, was wäre dafür nötig, welche Veränderungen wären in welchen Zeiträumen vorstellbar und welche Hemmnisse müssten angegangen werden?

Der Koalitionsvertrag der jetzigen Bundesregierung enthält ein eigenes Kapitel zur Kreislaufwirtschaft und die Ankündigung einer nationalen Kreislaufwirtschaftsstrategie (NKWS). Damit erhält dieses Thema nochmals eine gesteigerte politische Relevanz. Im Rahmen eines breit angelegten Stakeholderprozesses sind auch zivilgesellschaftliche Akteure an der Entwicklung der NKWS beteiligt, unter anderem über einen Runden Tisch zum Thema Fahrzeuge.

Diese Fragen sollen am Beispiel der Wertschöpfungskette Automobil diskutiert werden. Der Sektor wird sich mit dem Wandel zur Elektromobilität ohnehin massiv verändern

⁵ Europäische Kommission 2020.

1.2 Spezifische Herausforderungen für den Automobil-Sektor

Ziel der folgenden Analysen ist also weniger die Entwicklung einer konkreten Roadmap für einzelne Automobilunternehmen und ihre Zulieferer; im Fokus stehen die Effekte möglicher Hebel der Kreislaufwirtschaft auf die Wertschöpfungsketten. Die Automobilindustrie gehört in Deutschland zu den bedeutendsten Wirtschaftszweigen. Mit einer Bruttowertschöpfung von etwa 86 Milliarden Euro (Stand 2020) ist der Automobilsektor einer der wichtigsten Sektoren der gesamten gewerblichen Wirtschaft und beschäftigte in Deutschland im Jahr 2022 über 740.000 Menschen.

Diese Wertschöpfung basiert jedoch auf sehr ressourcen- und treibhausgasintensiven Produktionsprozessen. So verbraucht die Automobilindustrie jährlich etwa 10,6 Millionen Tonnen Stahl, eine Million Tonnen Aluminium, 108.000 Tonnen Kupfer, 47.600 Tonnen Zink sowie 292.000 Tonnen Blei.⁶ Neben dem Ressourcenverbrauch sind auch die Treibhausgas(THG)-Emissionen des Automobilsektors signifikant. Die weltweiten THG-Emissionen der Automobilindustrie betragen im Jahr 2018 rund 4,8 Gigatonnen CO₂. Das entspricht etwa neun Prozent der gesamten weltweiten CO₂-Emissionen.⁷ Neben der Automobilindustrie ist der Verkehrssektor für hohe CO₂-Emissionen verantwortlich, 2020 lagen sie bei 166 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalenten.⁸ Zwar sanken die kilometerbezogenen beziehungsweise spezifischen CO₂-Emissionen in Deutschland im Durchschnitt,⁹ jedoch erhöhte sich im selben Zeitraum das Verkehrsaufkommen. Insgesamt kam es damit zu einem Anstieg der absoluten Emissionen.¹⁰ Hinzu kommt die ineffiziente Auslastung von Pkws

in Deutschland: Ein Pkw wird durchschnittlich nur drei Prozent der Zeit genutzt, die restlichen 97 Prozent steht er still.¹¹ Aufgrund der ressourcen- und treibhausgasintensiven Wertschöpfungskette, der langen Lebensdauer von Fahrzeugen sowie dem hohen Stellenwert des Automobilsektors in Deutschland existieren ausreichend Gründe, den Sektor aus der Perspektive der Kreislaufwirtschaft zu betrachten. Darüber hinaus besitzt die deutsche Automobilindustrie weltweit einen hohen Stellenwert, insbesondere durch die Herstellung von rund 80 Prozent aller weltweit im Premiumsegment verkauften Autos, und kann hierdurch eine erhebliche Vorbildfunktion einnehmen. Auch die starke Vernetzung des Sektors in der Politik und den Industrieverbänden ist vorteilhaft, wenn über ökologische und soziale Regulierungen im Rohstoffsektor diskutiert wird.

Auch auf europäischer Ebene gerät das Thema Kreislaufwirtschaft zunehmend in den Fokus, getrieben insbesondere von der Europäischen Kommission mit extrem ambitionierten Vorgaben, unter anderem zum Ecodesign von Produkten, das zukünftig deutlich stärker auch Aspekte der Zirkularität berücksichtigen soll. Auch die EU-Vorgaben zum Klimaschutz inklusive der CO₂-Flottengrenzwerte erzeugen enormen Handlungsdruck. In Reaktion darauf hat sich unter anderem die Circular Cars Initiative in Zusammenarbeit mit dem World Economic Forum etabliert, die die Automobilwirtschaft durch Kreislaufwirtschaft mit dem 1,5-Grad-Klimaziel kompatibel machen möchte. Die folgende Abbildung zeigt die verschiedenen dort diskutierten Ansätze, die eine zentrale Grundlage der nachfolgenden Analysen sind.

⁶ Elsner et al. 2019. Schätzungen für das Jahr 2018, Angaben zum Zinkverbrauch: Verbrauch für das Jahr 2016. Interne WI-Abschätzung (im Rahmen des DownMet Projektes vom UBA).

⁷ Stephan; Lee; Kim 2019.

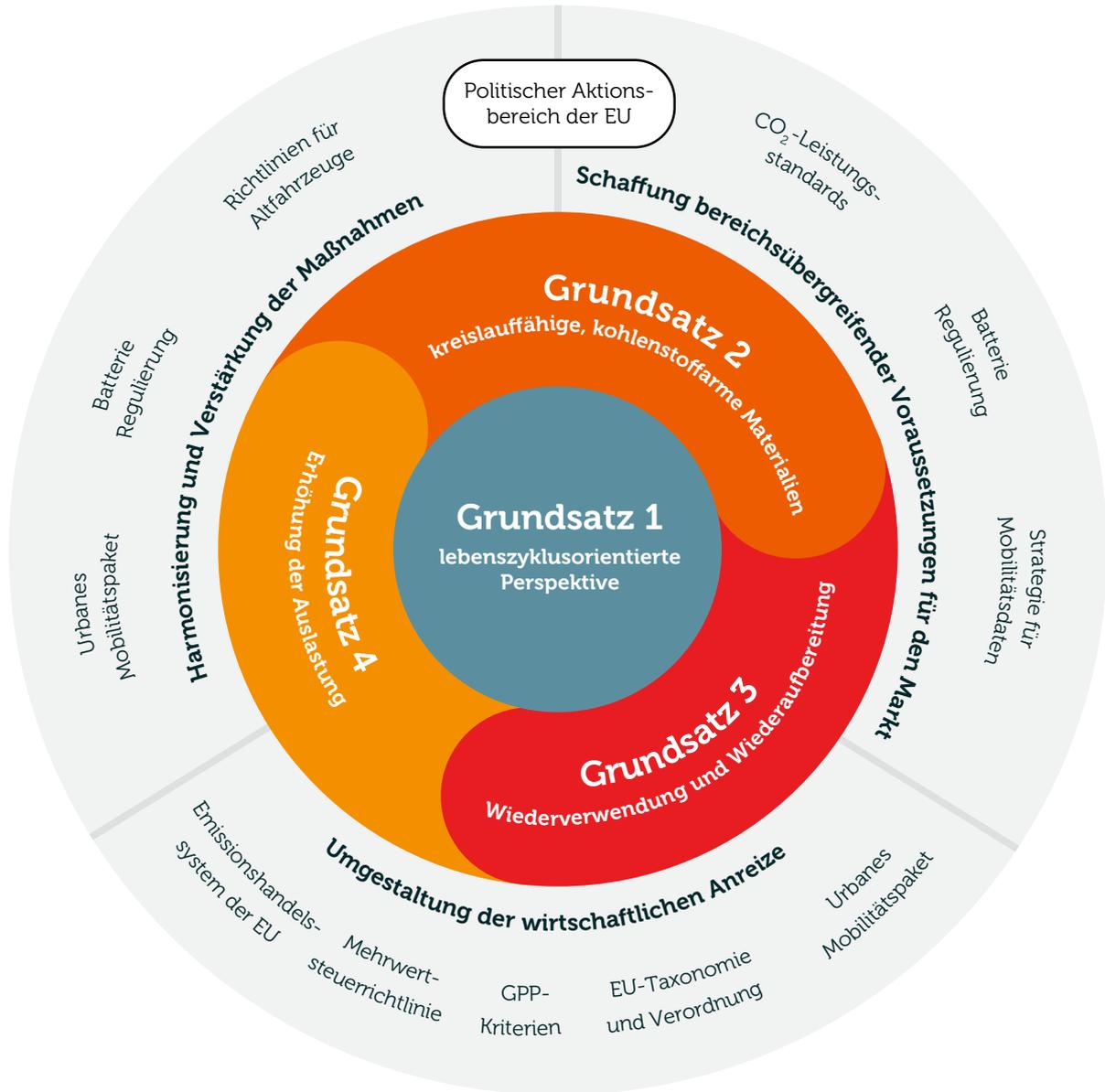
⁸ Umweltbundesamt 2023b; VerkehrsRundschau 2020.

⁹ Durchschnittliche Verringerung der kilometerbezogenen beziehungsweise spezifischen CO₂-Emissionen (Referenzwert 1990): bei Pkw um etwa 9 Prozent, bei Lkw um etwa 33 Prozent (Umweltbundesamt 2023b).

¹⁰ Umweltbundesamt 2023b; VerkehrsRundschau 2020.

¹¹ infas, DRL und IVT 2019.

Abbildung 2: EU-Aktionsrahmen zur Beschleunigung der Kreislaufwirtschaft in der Automobilindustrie



Quelle: World Economic Forum and SYSTEMIQ 2021 S. 7, eigene Übersetzung

Analog zur allgemeinen Kreislaufwirtschaftsdebatte fehlt es zum Beispiel auch im Kontext der Circular Cars Initiative nicht an Analysen, die ergeben, dass vielfältige auf Kreislaufwirtschaft ausgerichtete Hebel mit Kosteneinsparungen verbunden (oder zumindest kostenneutral umsetzbar) sein sollten. Auch hier stellen sich also konkrete Fragen nach den notwendigen Voraussetzungen, politischen Rahmenbedingungen oder Anreizstrukturen, um die theoretischen Potenziale in die Praxis umzusetzen.

Vor diesem Hintergrund werden im Rahmen dieser Studie folgende Leitfragen behandelt:

- Was bedeuten Kreislaufwirtschaft und zirkuläres Wirtschaften für die Wertschöpfungskette der Automobilität?
- Wo liegen die relevanten Potenziale, sowohl aus sozio-ökonomischer als auch aus ökologischer Perspektive?
- Was wären notwendige Rahmenbedingungen und Ansätze, um Wertschöpfung in Deutschland und Europa zu erhöhen?

Hierzu beschreibt Kapitel 2 eine Reihe konkreter Hebel entlang der Wertschöpfungskette des Automobils – vom Produktdesign über die Geschäftsmodelle zur Nutzung bis hin zum Recycling. Kapitel 3 fokussiert auf dieser Basis auf regulatorische Hemmnisse, Kapitel 4 benennt einzelne konkrete Instrumente, um diese in der Praxis anzugehen.

2. Hebel der Kreislaufwirtschaft entlang der Wertschöpfungskette Automobil

Dieses Kapitel beschreibt konkrete Ansatzpunkte, wie sich das Konzept der Kreislaufwirtschaft in die Wertschöpfungskette des Automobils integrieren lassen könnte. Die folgende Übersicht zeigt einige ausgewählte Hebel. Sie erhebt keinerlei Anspruch auf Vollständigkeit, sondern ist der Versuch, die Komplexität eines solchen Querschnittsthemas zumindest exemplarisch abzudecken. Die verschiedenen Hebel sind dabei nach dem Technologiereifegrad („technology readiness level“, TRL) sortiert, der

auf einer Skala von 1 bis 9 abbildet, wie weit die jeweilige Technik noch von der Marktreife entfernt ist.¹² Die Klassifizierung nach Technologiereifegrade zeigt zum einen die Unsicherheit, ob sich bestimmte Technologien überhaupt am Markt durchsetzen werden; zum anderen aber, wie lange es üblicherweise dauert, bis Marktreife erreicht werden kann (für jeden TRL werden hier typischerweise ein bis 5 Jahre angenommen).

Abbildung 3: Übersicht ausgewählter Kreislaufwirtschafts-Hebel in TRL 8 und 9

	TRL 8	TRL 9
Kunststoffe	biobasierte Kunststoffe, Leichtbau, chemische Recyclingverfahren wie Solvolyse und Pyrolyse	Rezyklateinsatz; mechanisches Recycling
Metalle		Recycling in geschlossenen Stoffkreisläufen ¹³
Reifen/Elektronik	biobasierte Kunststoffe	vertiefte Demontage
Batterien	Recycling	2nd use, Refabrikation
Zirkuläre Geschäftsmodelle	intermodulare Mobilität	Carsharing

Insgesamt zeigt sich bereits hier, dass die für die Kreislaufwirtschaft notwendigen Technologien grundsätzlich schon relativ weit entwickelt sind. In der Regel sind es eher regulatorische oder marktbasierende Hemmnisse, die ihrem Einsatz entgegenstehen, deshalb konzentrieren sich die folgenden Ausführungen darauf. Die Beschreibung der einzelnen Hebel folgt einer einheitlichen Struktur: Zunächst wird der grundsätzliche Wirkungsmechanismus des Hebels erläutert, dann folgen mögliche Chancen und Risiken aus Sicht der Kreislaufwirtschaft. Anschließend

werden der Status quo des Einsatzes und aktuelle Entwicklungstrends dargestellt; zum Schluss erfolgt eine Einschätzung der möglichen strukturellen oder räumlichen Veränderungen auf die Wertschöpfungskette Automobil.

Die Ausführlichkeit der Beschreibung richtet sich nach der zu erwartenden Relevanz der einzelnen Hebel, für manche wird es vermutlich nur in einzelnen Marktsegmenten tatsächliche Anwendungsmöglichkeiten geben.

¹² TRL 1 entspricht dabei bislang nur theoretisch beschriebenen Technologien („Beobachtung und Beschreibung des Funktionsprinzips“), TRL 9 steht für Technologien kurz vor der Marktreife („Qualifiziertes System mit Nachweis des erfolgreichen Einsatzes“). Dazwischen sind die verschiedenen TRLs wie folgt definiert: TRL 2: Beschreibung der Anwendung einer Technologie, TRL 3: Nachweis der Funktionstüchtigkeit einer Technologie, TRL 4: Versuchsaufbau im Labor, TRL 5: Versuchsaufbau in Einsatzumgebung, TRL 6: Prototyp in Einsatzumgebung, TRL 7: Prototyp im Einsatz, TRL 8: qualifiziertes System mit Nachweis der Funktionstüchtigkeit im Einsatzbereich.

¹³ Closed-Loop-Recycling ist der Prozess, bei dem ein Produkt oder Material verwendet und dann auf unbestimmte Zeit in ein neues Produkt umgewandelt werden kann, ohne dass seine Eigenschaften während des Recyclingprozesses verloren gehen.

2.1 Kreislaufhebel im Bereich Kunststoffe

2.1.1 Einsatz von Kunststoff-Rezyklat

Technische Beschreibung und Wirkungsmechanismus

Einer der aktuell auch in der Öffentlichkeit am intensivsten diskutierten Kreislaufwirtschafts-Hebel ist der Ersatz primären Kunststoffs durch Kunststoff-Rezyklate, die aus der Verwertung verschiedener Kunststoffabfallströme gewonnen werden.

Grundsätzlich muss dabei zwischen „post consumer recycle“ (PCR) und „post industrial recycle“ (PIR) unterschieden werden: PCR wird aus Abfallströmen gewonnen, die in Haushalten gewonnen werden und dort in sehr heterogenen Gemischen mit anderen Abfällen anfallen, zum Beispiel im Gelben Sack beziehungsweise in der Gelben Tonne. Ausgangsmaterial für Rezyklat aus industriellen Abfällen (PIR) können zum Beispiel Produktionsreste sein, die beim Wechsel der Einstellungen am Extruder anfallen. Hier weiß der Hersteller ganz genau, welche stofflichen Qualitäten dieses Material hat und dass Störstoffe grundsätzlich ausgeschlossen werden können; deshalb wird dieses Material in der Regel ohnehin wieder neuen Produktionsprozessen zugeführt. Bei der Angabe von Rezyklatanteilen wird allerdings häufig nicht differenziert, aus welchen Quellen das Material stammt.

Der Einsatz von Kunststoffrezyklaten ist in vielen Bereichen streng reglementiert. Beim Einsatz in Verpackungen mit Lebensmittelkontakt kommen beispielsweise generell nur Materialien aus der Rückgabe von Pfandflaschen in Betracht, die einen sehr niedrigen Störstoffanteil aufweisen. Im Bereich des Automobilbaus sind es dagegen eher technische Spezifikationen, die den Rezyklateinsatz erschweren, wenn zum Beispiel 100 Prozent Schadstofffreiheit gefordert wird, anstatt minimale Toleranzgrenzen anzugeben. Tatsächlich weisen Kunststoffrezyklate für viele technische Parameter eine größere Spannweite auf als primäre Kunststoffe, unter anderem abhängig vom Ausgangsmaterial. Gleichzeitig gibt es zunehmend Bei-

spiele, die belegen, dass auch ohne Qualitätsverlust Rezyklat eingesetzt werden kann (zum Beispiel im Bereich von Duschgefäßflaschen).

Einschränkend ist zu erwähnen, dass analog zum Papierrecycling auch der Rezyklateinsatz bei Kunststoffen immer eine Zumischung von Neumaterial erfordert, etwa in der Größenordnung von zehn Prozent – ein vollständig geschlossener unternehmensinterner Kunststoffkreislauf ist zum aktuellen Stand der Technik noch nicht möglich. Im begrenzten Ausmaß ist also auch jede Form des Recyclings nur ein Downcycling¹⁴, sodass der möglichst effiziente Einsatz von Kunststoffen auch hier oberste Priorität haben sollte. Abhängig vom spezifischen Kunststoff können etwa 15 Nutzungsdurchläufe erreicht werden.

Chancen/Risiken aus CE-Perspektive

Der Einsatz von Kunststoff-Rezyklat bietet aus Sicht der Kreislaufwirtschaft verschiedene Vorteile: Der Produktionsprozess ist in der Regel mit deutlich geringeren CO₂-Emissionen verbunden als die Herstellung von primärem Kunststoff, für den in der Regel Erdöl gefördert werden muss. Laut Material Economics können dadurch bis zu 2 Tonnen CO₂ pro Tonne Kunststoff eingespart werden.¹⁵ Die genauen Einsparungen sind abhängig von der Kunststoffsorte und den konkreten Qualitätsanforderungen, im Durchschnitt liegen sie bei etwa 50 Prozent (vgl. Abbildung 4). Die Zahlen können jedoch je nach Annahmen und Ansatz in der Ökobilanzierung sehr unterschiedlich ausfallen, ohne dass das immer transparent angegeben wird, zum Beispiel bei der Frage, wie häufig ein Kunststoff im Kreis geführt werden kann beziehungsweise welche Menge an neuem Material zugespeist werden muss.

Die folgende Abbildung zeigt die Ergebnisse einer Ökobilanzierung des Einsatzes von Kunststoffrezyklat je nach Annahme, ob die Einsparungen nur dem Rezyklat oder auch dem Ausgangsprodukt angerechnet werden (Cut-off vs. Open Loop).

¹⁴ Downcycling oder Kaskadierung ist das Recycling von Abfällen, bei denen das recycelte Material von geringerer Qualität und Funktionalität ist als das ursprüngliche Material.

¹⁵ Material Economics 2018.

Abbildung 4: CO₂-Einsparungen durch den Einsatz von Kunststoffrezyklat

	Neuware (Pellets) inklusive des Energieinhalts des Rohstoffs	Gesamtenergiebedarf Rezyklat im Verhältnis zu Neuware	Energieeinsparung Rezyklat im Vergleich zu Neuware	Neuware (Pellets) exklusive des Energieinhalts des Rohstoffs	Gesamtenergiebedarf Rezyklat im Verhältnis zu Neuware	Energieeinsparung Rezyklat im Vergleich zu Neuware
CUT-OFF						
MJ pro kg Rohstoff						
Recyceltes PET	69,8	21 %	79 %	33,3	45 %	55 %
Recyceltes HDPE	75,3	12 %	88 %	25,0	35 %	65 %
Recyceltes PP	74,4	12 %	88 %	25,1	35 %	65 %
OPEN LOOP						
MJ pro kg Rohstoff						
Recyceltes PET	69,8	61 %	39 %	33,3	72 %	28 %
Recyceltes HDPE	75,3	56 %	44 %	25,0	67 %	33 %
Recyceltes PP	74,4	56 %	44 %	25,1	68 %	32 %

Gesamtenergiebedarfe für Rezyklate im Vergleich zu Neuware berechnet mit und ohne Energieinhalt der Neuware (Quelle:Franklin Associates 2018)

Beispielsweise konnte Daimler durch den Einsatz von Kunststoffrezyklat auch in kleinen Komponenten (wie Leitungsbefestiger, Clips oder Ähnliches) jährlich 1.000 Tonnen CO₂ einsparen.¹⁶ Der Einsatz von Kunststoff-Rezyklat führt zudem je nach Einsatzgebiet der Fahrzeugkomponenten zu Primärrohstoffeinsparungen. Das Isoliermaterial von BMW etwa besteht bis zu 90 Prozent aus PUR-Rezyklat und unter Berücksichtigung von Ökologie und Ökonomie lassen sich laut BMW Rezyklate bei 15 bis 20 Gewichtsprozent der gesamten Kunststoffumfänge eines Fahrzeuges einsetzen.¹⁷

Der Einsatz von Post Consumer Rezyklat setzt die entsprechende Sammlung voraus, wodurch auch das Risiko eines Eintrags in die Umwelt reduziert wird. Der mögliche Einsatz von Kunststoffrezyklat lässt die Abfallströme, die sich für eine hochwertige Verwertung eignen, zu einem begehrten Wirtschaftsgut werden. Damit können beispielsweise über Mindestrezyklatquoten auch Anreize für den Aufbau neuer Sammel- und Verwertungsinfrastrukturen gesetzt werden (entweder durch die Hersteller oder spezialisierte Akteure der Recyclingwirtschaft).

Entscheidend für die ökologische Gesamtbetrachtung ist es, dass das eingesetzte Rezyklat am Ende der Nutzungsphase wieder zurückgewonnen wird und in mehrfachen Schleifen, gegebenenfalls auch in Kaskadenform, verwendet werden kann. Aus diesem Grund ist der Einsatz in Komponenten beim Automobilbau zu hinterfragen, falls diese Komponenten bei Fahrzeugen, die ins Nicht-EU-Ausland verbracht wurden, nicht recycelt werden.

Status quo und Trend

Früher war der Einsatz von Kunststoffrezyklat im Automobilbereich auch im Vergleich zu anderen Sektoren begrenzt, noch 2019 lag er bei gerade 5,5 Prozent.¹⁸ Eingesetzt wurden Kunststoffrezyklate fast ausschließlich bei nicht sicherheitsrelevanten Komponenten, die nicht direkt sichtbar waren. Das lag zum einen an Bedenken bei Haptik und Optik, da bei Rezyklaten häufiger Farbschwankungen auftraten. Auch aus ökonomischen Gründen war der Einsatz überwiegend auf Rezyklate aus Industrieprozessen begrenzt. Ein zentrales Hemmnis war auch die Verfügbarkeit von entsprechend hochwertigen Rezyklaten: Angesichts der enormen Mengen an Kunststoffen, die einzelne Hersteller einsetzen, konnte der im Kern mittelständisch

¹⁶ Daimler AG o. J.

¹⁷ BMW AG o. J.

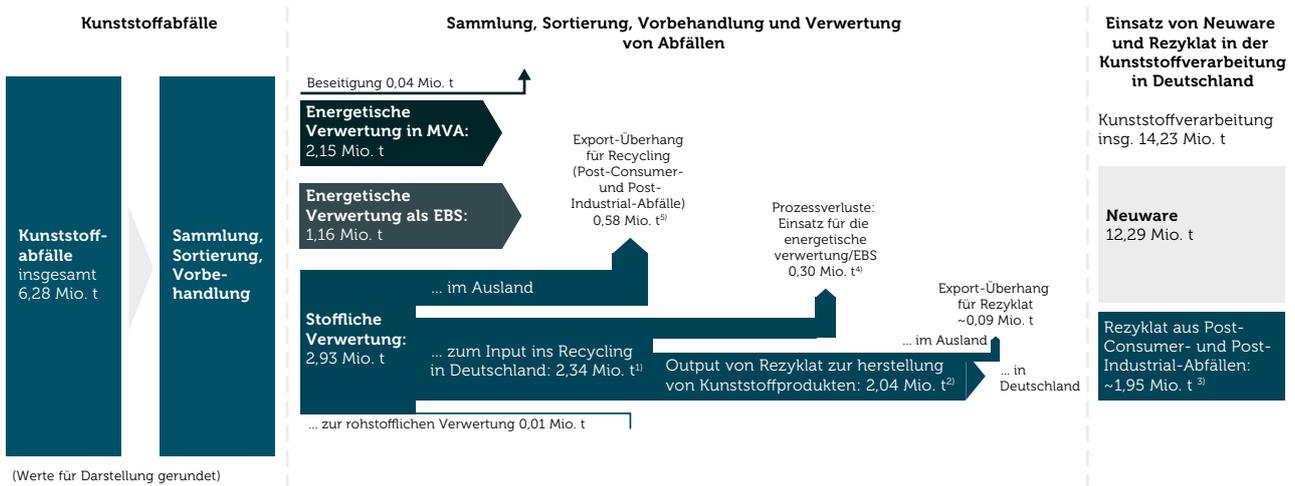
¹⁸ Conversio 2020.

geprägte Kunststoffrecyclingsektor häufig nicht ausreichend zuverlässig die nötigen Liefermengen garantieren. Es entstand eine Patt-Situation: Die Recycling-Industrie wollte nicht ohne entsprechende Abnahmegarantien

investieren und die OEMs wollten ohne garantierte Verfügbarkeit ihr Produktdesign nicht anpassen. So ergaben sich die in der folgenden Abbildung niedrigen Abdeckungsraten durch Kunststoffrezyklate.

Abbildung 5: Kunststoffrezyklatanteile in Deutschland

Stoffstrombild: Aufbereitung von Kunststoffabfällen zum Wieder-Einsatz der Kunststoffverarbeitung



Quelle: Conversio 2020, S. 11

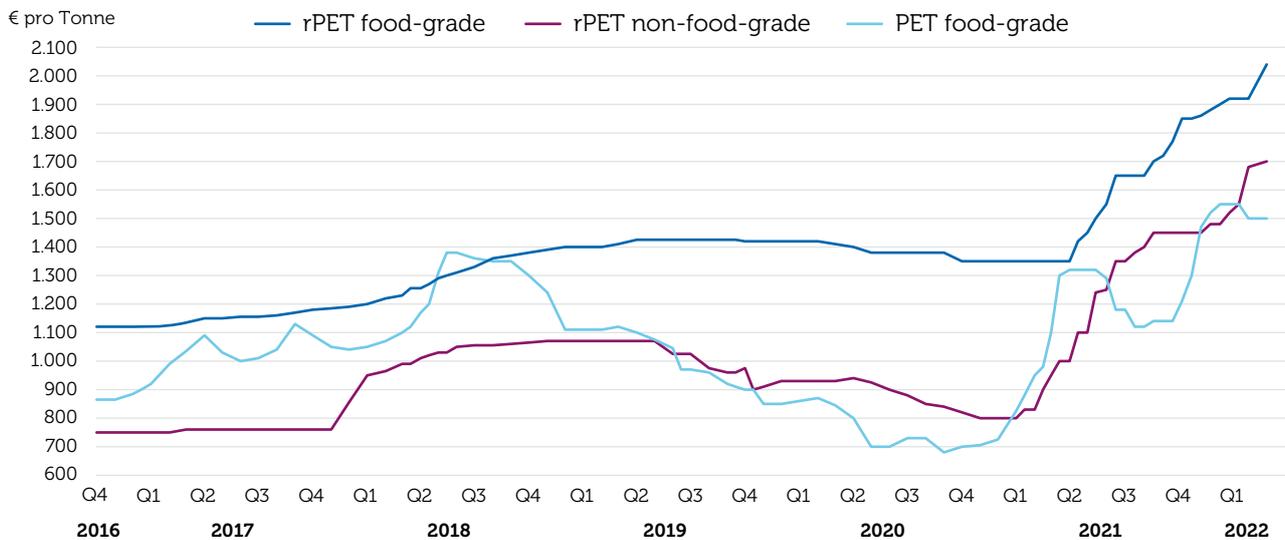
In den vergangenen Jahren hat sich jedoch eine enorme Dynamik entwickelt, getrieben durch technologische Fortschritte bei der Sortier- und Aufbereitungstechnik sowie durch die emotional geführte Debatte um Kunststoffe und die mit dem Rezyklateinsatz verbundenen Optionen zur CO₂-Einsparung. Immer mehr Hersteller verändern ihre Vorgaben für den Einkauf in Richtung „secondary first“: Die Einkäufer müssen mittlerweile explizit begründen, warum sie für einzelne Teile noch primären Kunststoff einsetzen wollen; wo möglich soll Rezyklat eingesetzt werden.

Dieser Trend zum Einsatz von Kunststoff-Rezyklaten lässt sich darauf zurückführen, dass ökologisch motivierte Kunden sich analog zu Verpackungen auch beim Autokauf am Kriterium der Rezyklatanteile orientieren, und dass regulatorische Vorgaben abzusehen sind: Die Europäische Kommission setzt in der Umsetzung ihres Aktionsplans Kreislaufwirtschaft vor allem bei Kunststoffen immer stärker auf das Instrument einer verbindlichen Rezyklatquote („mandatory recycled content“) als Voraussetzung für die Inverkehrbringung von Produkten auf dem europäischen Markt. Entsprechende Vorgaben wurden in die Batterie-Richtlinie integriert, Ähnliches wird für die im Jahr 2023 erwartete Revision der Altauto-Richtlinie angenommen. Für die OEMs und ihre Zulieferer wird so der Zugriff auf entsprechende Rezyklatmengen zu einer strategischen Herausforderung; vor allem deshalb, da aktuell die Behandlungskapazität für Kunststoffabfälle noch begrenzt ist.

Parallel laufende Prozesse wie die Entwicklung von Industriestandards für die Qualität von Kunststoffrezyklaten vereinfachen den Handel mit solchen Sekundärrohstoffen und machen ihn kostengünstiger im Einsatz. Ein konkretes Beispiel ist die DIN SPEC 91446 zur „Klassifizierung von Kunststoff-Rezyklaten durch Datenqualitätslevel für die Verwendung und den (internetbasierten) Handel“. DIN SPECS sind eine Vorläuferform von DIN Normen; diese DIN SPEC ist deshalb interessant, weil sie es ermöglicht, Kunststoffrezyklate nach vier unterschiedlich umfangreichen Datenqualitätsstufen zu klassifizieren, auf die sich Anbieter und Käufer dann beziehen können.

Am Beispiel PET lässt sich zurzeit erkennen, zu welchen Effekten die rasant steigende Nachfrage bei einem eher unelastischen Angebot – die Genehmigung und der Bau solcher Anlagen erfordern einfach einen gewissen Zeitraum – führen kann: In den vergangenen Jahren lag der Preis für recyceltes PET kontinuierlich etwa 10–20 Prozent über dem Preis für Neuware (vgl. Abb. 6), im Jahr 2022 haben die Preise sowohl für Neuware als auch für Rezyklate wegen der hohen Energiepreise nochmals einen Sprung gemacht. In einer solchen Situation besteht das Risiko, dass regulatorische Vorgaben für Mindestrezyklatquoten nur zum Abzug von Rezyklat aus anderen Sektoren führen, die von solchen Regulierungen (noch) nicht betroffen sind (beispielsweise der Bau), ohne dass tatsächlich mehr Kunststoff im Kreis geführt wird.

Abbildung 6: Preisentwicklung von recyceltem PET im Vergleich zu Neuware



Quelle: Kahlert, S., & Bening, C. R. 2022, S. 6, eigene Übersetzung

Effekte auf die Wertschöpfungskette (räumlich, Arbeitsplatzeffekte)

Der verstärkte Rezyklateinsatz führt im ersten Moment zu einem Rückgang der einheimischen Nachfrage nach Primärkunststoff, der zu großen Teilen von deutschen Unternehmen produziert wird.

Dieser Verlust an Wertschöpfung wird jedoch durch zusätzliche Geschäftsfelder im Bereich von Sammlung, Aufbereitung und Vermarktung von Sekundärrohstoffen kompensiert; hier ist die Wertschöpfung deutlich stärker räumlich gebunden und zum ganz überwiegenden Anteil von einheimischen Unternehmen besetzt. Hinzu kommt die ohnehin starke Exportorientierung der chemischen Industrie: Angesichts der prognostizierten globalen Nachfragesteigerungen für Kunststoffe ist nicht zu erwarten, dass eine leicht reduzierte einheimische Nachfrage zu tatsächlich relevanten Wertschöpfungseinbußen führen wird.

Der Koalitionsvertrag betont zudem die Absicht, sowohl auf nationaler als auch insbesondere auf europäischer Ebene den Export von Kunststoffabfallströmen zu reduzieren. Hieraus werden sich neue Inputströme für die Recyclingindustrie mit weiteren positiven Effekten auf die einheimische Beschäftigung und die Wertschöpfung ergeben. Eine Schlüsselrolle spielt hier der Anlagenbau für Recyclingtechnologien, bei dem Deutschland auch international sehr stark positioniert ist.¹⁹ Durch den Trend zum Einsatz von Kunststoffrezyklaten werden sich relevante neue Marktchancen ergeben; zunächst für den einheimi-

schen Markt, absehbar jedoch auch international, wenn entsprechende Normen und Industriestandards weiterhin in Deutschland entwickelt werden.²⁰

2.1.2 Kunststoff – mechanisches Recycling

Technische Beschreibung und Wirkungsmechanismus

Dem zuvor beschriebenen Einsatz von Kunststoffrezyklat geht in der Regel das mechanische Recycling kunststoffhaltiger Abfallströme voraus. Hier muss grundsätzlich unterschieden werden zwischen dem Recycling von Industrieabfällen, gemischten Haushaltsabfällen und sortenrein erfassten Abfällen, zum Beispiel aus der Rücknahme von Pfandflaschen oder aus der vorgeschriebenen Demontage großer Kunststoffteile im Automobilsektor.

Das Recycling selbst folgt einem klaren Muster. Die Kunststoffabfälle werden zerkleinert, vorsortiert und gereinigt und anschließend aufgeschmolzen. Dabei unterscheidet sich die Recyclingfähigkeit der Kunststoffsorten ganz erheblich, zum Beispiel von Duroplasten und Thermoplasten.²¹ Längst nicht alle Kunststoffe lassen sich sinnvoll mechanisch recyceln. Hinzu kommen die vielfältigen Additive, die die stofflichen Eigenschaften des Kunststoffs maßgeblich definieren, zum Beispiel seine Härte oder UV-Beständigkeit. In vielen Fällen sind die Additive mit Blick auf die Kosten relevanter als das eigentliche Ausgangsmaterial, sodass die Rentabilität des Verfahrens oft maßgeblich davon abhängt, entsprechende Fraktionen zu bilden, bei denen nicht nur der Kunststoff, sondern auch die Zuschlagstoffe in hochwertig geschlossenen Kreisläufen erneut genutzt werden können.

¹⁹ Birnstengel et al. 2020.

²⁰ Seit Oktober 2021 neuer DIN-Standard DIN SPEC 91446 für die Klassifizierung von Kunststoffrezyklaten.

²¹ Während Thermoplaste nach Bedarf wieder erhitzt, umgeformt und abgekühlt werden können, sind Duroplaste Materialien, die sich beim Erhitzen verfestigen, nach der anfänglichen Formgebung aber nicht umgeformt oder erhitzt werden können.

Chancen/Risiken aus CE-Perspektive

Wie dargestellt, ist die Schließung von Stoffkreisläufen durch mechanisches Kunststoffrecycling kein Selbstzweck, sondern muss im Einzelfall betrachtet werden. In vielen Fällen können so Sekundärkunststoffe gewonnen werden, die erheblich geringere CO₂-Emissionen verursachen. Je nach Art des Kunststoffs oder nach Kombination der eingesetzten Kunststoffe können jedoch zum Beispiel thermische Verwertungsverfahren die auch ökologisch sinnvollere Alternative sein, zum Beispiel bei mit Schadstoffen belasteten Kunststofffraktionen.

Im Gegensatz etwa zu Verpackungen haben Fahrzeuge eine deutliche längere Nutzungsdauer, sodass hier eingesetzte Kunststoffe nur in Ausnahmefällen in weniger als zehn Jahren nach ihrer Herstellung tatsächlich einem Recycling zugeführt werden. Für eine geschlossene Kreislaufführung stellen sich also zwei Fragen:

- Können diese Kunststoffe noch auf den aktuellen Stand der Technik gebracht werden, zum Beispiel durch die Beimischung neuer Additive?
- Und wurden eventuell Stoffe eingesetzt, die mittlerweile aus unterschiedlichen Gründen nicht mehr zugelassen sind (ein Beispiel dafür wären aus Gesundheitsschutzgründen mittlerweile verbotene Flammschutzhemmer auf Basis von Hexabromcyclododecan aus den Elektronikkomponenten von Fahrzeugen)?

Insgesamt bieten aber gerade die Kunststoffe im Automobilsektor noch nicht ausgeschöpfte Potenziale für den gesteigerten Einsatz von Rezyklaten.

Status quo und Trend

Um die gesetzlich vorgeschriebenen Recyclingquoten zu erreichen, werden bereits heute die meisten der in Fahrzeugen eingesetzten Kunststoffe stofflichen Verwertungsverfahren zugeführt. Zumeist handelt es sich jedoch um Downcycling, wobei die spezifischen Qualitäten des spezifischen Materials wegen der zahlreichen unterschiedlichen Kunststoffe nur sehr eingeschränkt erhalten bleiben. Eine besondere Herausforderung ist die sogenannte Schredder-Leichtfraktion, in der viele unterschiedliche Kunststoffe in kleinstmengen und in Kombination mit Störstoffen erfasst werden.

Mit zunehmendem Fokus auf die Kreislauffähigkeit von Fahrzeugen gewinnt auch das recyclingfreundliche Design an Bedeutung. Ein konkretes Beispiel sind Kunststoffteile im Motorinnenraum, die früher wegen der

Verschmutzung mit Öl in der Regel aus gerußtem schwarzem Kunststoff bestanden, der in der Sortierung durch Nahinfrarot-Detektoren kaum erfasst werden kann. Mit dem steigenden Einsatz von Elektromotoren wird auf solche schwarzen Kunststoffe zunehmend verzichtet, sodass ein höherer Anteil der Kunststoffteile tatsächlich sinnvoll sortiert werden kann.

Im Automobilsektor gibt es verschiedene Überlegungen, Kunststoffe durch eine Art Wasserzeichen oder den Einsatz von Markern zu kennzeichnen, sodass sie besser in unterschiedliche Fraktionen sortiert oder sogar einzelnen Herstellern zugeordnet werden können. Damit könnten sich in Zukunft Möglichkeiten für Systeme individueller Herstellerverantwortung ergeben, bei denen es sich für den einzelnen Hersteller direkt finanziell auszahlen würde, eine gute stoffliche Recyclingfähigkeit zu gewährleisten.

Effekte auf die Wertschöpfungskette (räumlich, Arbeitsplatzeffekte)

Auf die klassischen Wertschöpfungsketten hat das stoffliche Recycling nur einen begrenzten Einfluss (die im zweiten Schritt resultierenden Effekte durch den verstärkten Rezyklateinsatz siehe Kapitel 2.1.1). Im Vergleich zur thermischen Verwertung ist Recycling mit Sicherheit deutlich arbeitsintensiver, sodass hier im begrenzten Ausmaß neue Arbeitsplätze entstehen könnten.

Relevantere Effekte könnten sich durch Anreize für die Hersteller ergeben, das Recycling ihrer Fahrzeuge in den eigenen Konzern zu integrieren, sodass sich Investitionen in die Kreislauffähigkeit der Fahrzeuge auch direkt in niedrigeren Kosten niederschlagen. Im Bereich des Recyclings von Verpackungsabfällen ist eine solche Tendenz mittlerweile deutlich zu beobachten, zum Beispiel bei der Schwarz-Gruppe mit dem Aufbau eines eigenen Dualen Systems PreZero²² oder der strategischen Partnerschaft zwischen Aldi und Interseroh²³. Im Automobilsektor gibt es mit Encory²⁴ als gemeinsamem Joint Venture von BMW und Interseroh einen ersten ähnlichen Fall, der mittelfristig zu einer starken Veränderung des bislang sehr klein- und mittelständisch strukturierten Altautoverwertungssektors führen könnte.

²² Prezero o. J.

²³ Interseroh Plus o. J.

²⁴ Encory o. J.

2.1.3 Chemisches Kunststoff-Recycling

Technische Beschreibung und Wirkungsmechanismus

Der Begriff „chemisches Recycling“ ist bislang nicht eindeutig beziehungsweise abschließend definiert. Im Rahmen der Circular Economy Initiative Deutschland wurde eine Abgrenzung entwickelt, die verdeutlichen soll, dass es sich um ein breites Spektrum unterschiedlicher Technologien handelt: „Chemisches Recycling bezeichnet die Gesamtheit aller Verfahren, die einerseits mehr als nur werkstoffliche oder physikalische Vorgänge zur Aufbereitung des Ausgangsstoffs nutzen, aber andererseits nicht zur vollständigen chemischen Umsetzung (Verbrennung) mit Luftsauerstoff führen.“²⁵

Die Pyrolyse ist hierbei das am häufigsten verwendete Verfahren: Durch Pyrolyse werden Polymere bei Temperaturen von über 300 Grad Celsius in einer inerten Atmosphäre, das heißt ohne Oxidation aufgespalten. Je nach Prozessbedingungen entstehen Pyrolysegas, synthetisches Rohöl/Pyrolyseöl und Pyrolysewachse, die durch weitere veredelnde Schritte zu höherwertigen Chemikalien weiterverarbeitet werden können, beispielsweise zu Monomeren für die Polymerchemie, zu Grundchemikalien oder Treibstoffen. Alternative Technologien sind zum Beispiel die Chemolyse, Hydrierung oder Vergasung – alle können als Formen chemischen Recyclings angesehen werden. Sie unterscheiden sich insbesondere bei den notwendigen Prozesstemperaturen und damit dem Energieaufwand, gleichzeitig haben sie unterschiedliche Anforderungen an die Ausgangsstoffe: So werden zum Beispiel bei der Chemolyse die Polymere des Kunststoffabfalls mithilfe von chemischen Reagenzien in ihre Monomerbestandteile zerteilt, der Prozess läuft bereits bei Temperaturen zwischen 180 und 240 Grad.²⁶ Diese Technologie ist ausschließlich für Polykondensationskunststoffe wie Polyester und Polyamide geeignet.

Chancen/Risiken aus CE-Perspektive

Angesichts der Vielzahl verschiedener Technologien und deren sehr unterschiedlicher Entwicklungsstände lässt sich keine seriöse Gesamtbewertung des chemischen Recyclings vornehmen. In den verschiedenen Verfahren steckt jedoch erkennbar erhebliches Entwicklungspotenzial, insbesondere als Verwertungsrouten für

Kunststoffabfälle, für die kein werkstoffliches Recycling (mehr) möglich ist, zum Beispiel für Kunststoffabfälle aus der Schredder-Leichtfraktion im Fahrzeugrecycling. Die oben beschriebenen Verfahren haben das Potenzial, wieder das reine, ursprüngliche Polymer (Virgin Quality) zu erzeugen. Dieses kann als Beimischung zu werkstofflichem Rezyklat verwendet werden, um die erforderlichen Qualitätsanforderungen an ein Rezyklat sicherzustellen. Im Vorfeld müssen jedoch für die einzelnen chemischen Verfahren noch Energiebilanzen erstellt, Emissionen geprüft, Gesundheitsrisiken analysiert und die Umweltbilanz im industriellen Maßstab betrachtet werden.

Unter anderem das Umweltbundesamt weist jedoch darauf hin, dass nach aktuellem Stand der Forschung das werkstoffliche Recycling aus ökologischer Sicht auch in Zukunft zu bevorzugen wäre.²⁷ Von daher werden regulatorische Rahmenbedingungen nötig sein, die ein Unterlaufen von Anreizen für ein „Design for Recycling“ verhindern.

Abbildung 7 zeigt die ökobilanzielle Bewertung verschiedener Verfahren für die Produktion von PET. Verglichen werden die konventionelle Primärproduktion, mechanisches Recycling und ein spezifisches, an der TU Delft entwickeltes chemisches Recyclingverfahren. Die Ergebnisse zeigen, dass das mechanische Recycling die beste Energiebilanz erzielt und das chemische Recycling deutlich besser ist als die Primärproduktion. Insofern bestehen aus Kreislaufwirtschafts-Perspektive immer dann Potenziale, wenn das chemische Recycling eine Nachfrage nach primären PET substituiert, nicht aber dann, wenn damit Material aus dem mechanischen Recycling abgezogen würde. Es ist festzuhalten, dass das chemische Recycling durch den steigenden Anteil erneuerbarer Energien, die für diese Prozesse genutzt werden können, in Zukunft vor allem gegenüber der Verbrennung noch besser abschneiden wird.

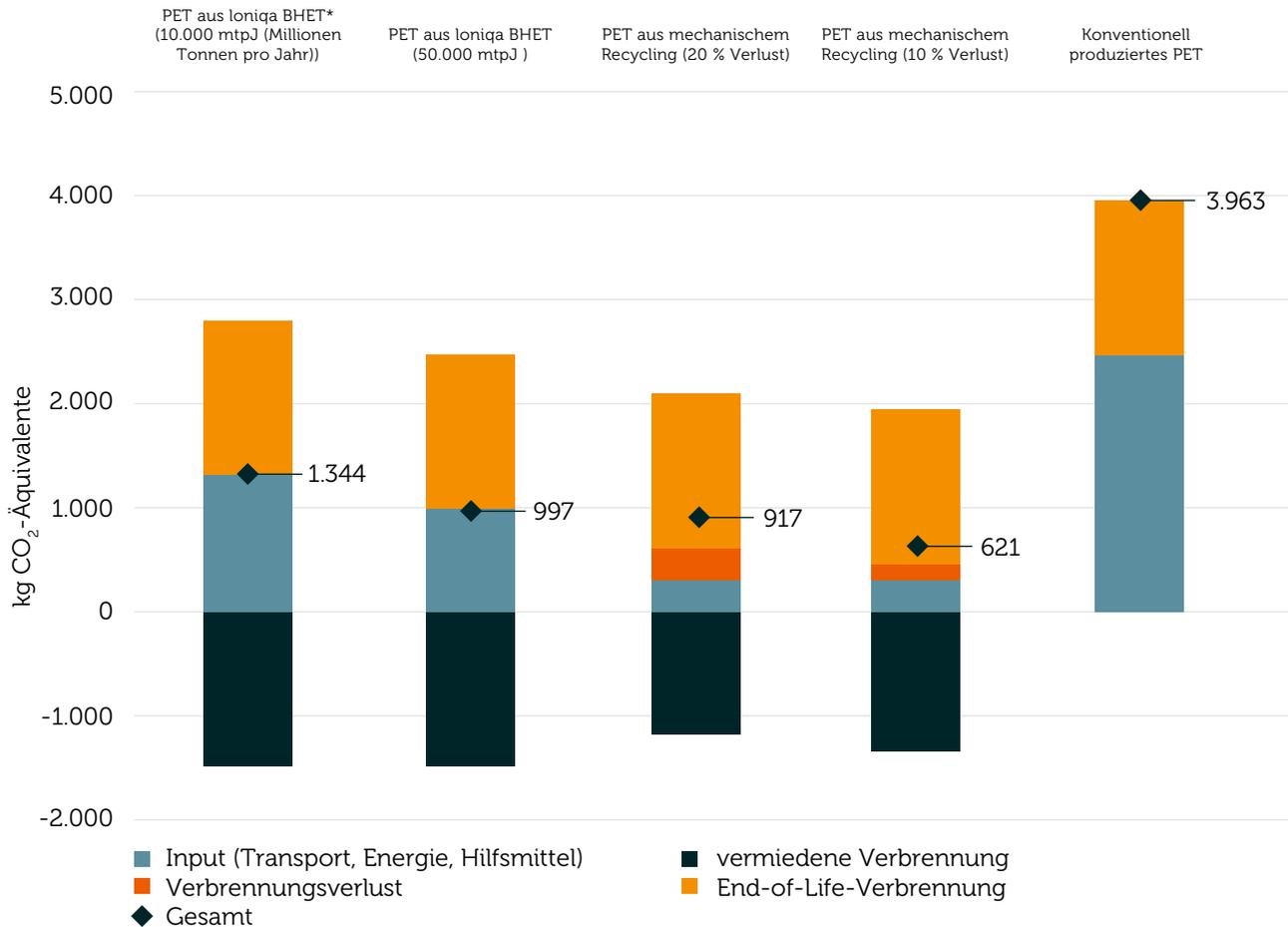
Nach Analysen des Wuppertal Instituts gemeinsam mit der RWTH Aachen und Fraunhofer UMSICHT ist abzusehen, dass das chemische Recycling gegenüber der Verbrennung beziehungsweise Mitverbrennung in Zementwerken zu CO₂-Einsparungen von etwa 50 Prozent führen kann.

²⁵ Elsner et al. 2021, S. 38.

²⁶ Lechleitner et al. 2020.

²⁷ Vogel et al. 2020.

Abbildung 7: Ökobilanzielle Bewertung verschiedener PET-Produktionsverfahren



Quelle: Bergsma/Lindgreen 2018

Status quo und Trend

Im Rahmen eines Forschungsprojekts für das Wirtschafts- und Innovationsministerium NRW hat das Wuppertal Institut den aktuellen Status quo an Projekten zum chemischen Recycling in Deutschland erfasst.²⁸ Die Auswertung zeigte, dass sich der überwiegende Teil der insgesamt 174 identifizierten Projekte aktuell noch im Status Labormaßstab befindet. Zudem werden überwiegend Reinstoffe als Einsatzmaterial betrachtet und nicht die für den Praxisbetrieb relevanten heterogenen Inputströme. Von 133 Pyrolyseverfahren werden lediglich zwei Prozesse im Pilotmaßstab beschrieben. Im Vergleich dazu ist die Vergasung etwas weiterentwickelt, großskalige Prozesse existieren allerdings hier auch nur begrenzt. Aus den betrachteten Quellen zur Vergasung stehen zehn Prozesse mit einer technologischen Reife $TRL \geq 6$ 41 Prozessen im Labormaßstab gegenüber. Darüber hinaus werden in 150 von 174 Quellen Reinstoffe als Ausgangsmaterial eingesetzt (Pyrolyse und Vergasung zusammen betrachtet).²⁹

Viele Quellen betrachten definierte Kunststoffgemische und nur wenige verunreinigte gemischte Kunststoffabfälle. Auch die Arbeitsgruppe Kunststoffverpackungen der Circular Economy Initiative Deutschland geht davon aus, dass das chemische Recycling bis zum Jahr 2030 noch nicht in relevanten Größenordnungen Rezyklate produzieren können wird.³⁰ Spezielle Verfahren wie die Depolymerisierung werden nach aktuellen Einschätzungen nicht vor 2040 am Markt verfügbar sein.³¹ Die Dynamik der Entwicklungen in Deutschland könnte sich beschleunigen, da das chemische Recycling im Koalitionsvertrag explizit als Option für die Kreislaufführung von Kunststoffen benannt wurde. Zu beachten ist, dass speziell in den Niederlanden Planungen für industrielle Anlagen zur Pyrolyse gemischter Kunststoffabfälle vorangetrieben werden, die Betreiber dieser Anlagen könnten sich den Zugriff auf die entsprechenden Stoffströme insbesondere in den grenznahen Gebieten wie NRW sichern.

²⁸ IN4climate.NRW 2020.

²⁹ Vgl. ebd.

³⁰ Circular Economy Initiative Deutschland 2021.

³¹ Geres et al. 2019.

Effekte auf die Wertschöpfungskette (räumlich, Arbeitsplatzeffekte)

Das chemische Recycling wird in Zukunft erheblichen Einfluss auf die Gestaltung zirkulärer Wertschöpfungsketten im Bereich Kunststoff haben. Sowohl im Automobilbereich als auch in anderen Sektoren (Verpackung, Bau) werden auf absehbare Zeit Kunststoffabfälle anfallen, die sich nicht für ein mechanisches Recycling eignen: Hier könnte angesichts der rasant ansteigenden Nachfrage nach hochwertigem Kunststoffzyklat mit chemischem Recycling ein hoch dynamisches Geschäftsfeld mit erheblichen Arbeitsplatzpotenzialen entstehen.

Wegen erheblicher Skaleneffekte (economies of scale) wird vermutlich nur eine begrenzte Anzahl solcher Anlagen entstehen, die dafür jedoch relativ groß ausgelegt sein werden – mit entsprechend großen Einzugsgebieten. In der dann entstehenden Wertschöpfungskette wird die chemische Industrie eine Schlüsselstellung einnehmen und auf dieser Grundlage neue Geschäftsmodelle entwickeln können. Die volkswirtschaftliche Gesamtbilanz wird davon abhängen, dass dabei nicht der Markt für das werkstoffliche Recycling in Mitleidenschaft gerät.

Wie erwähnt, wird das chemische Recycling speziell in den Niederlanden massiv vorangetrieben, mit strategischer Positionierung im Umfeld von Häfen wie Rotterdam, die gleichzeitig wichtiger Produktions- und Umschlagstandort für die chemische Industrie sind. Die Arbeitsplatzeffekte dort wie in Deutschland werden massiv davon abhängen, welche Inputströme verarbeitet werden: Wenn es gelingt, Kunststoffabfälle aus der Verbrennung in Pyrolyseanlagen oder Ähnliches umzusteuern, könnten damit durchaus zusätzliche Arbeitsplätze verbunden sein – zeitlich begrenzt durch den Bau der Anlagen, langfristig im Betrieb, indirekt durch die Bereitstellung zusätzlicher Rezyklatmengen. Das American Chemistry Council geht von etwa 80 neuen Arbeitsplätzen für eine solche Anlage aus, allerdings hängt diese Zahl von deren konkreter Größe ab.³²

2.1.4 Biobasierte Kunststoffe

Technische Beschreibung und Wirkungsmechanismus

Neben der Kreislaufführung von Kunststoffen spielen auch biobasierte Kunststoffe im Automobilsektor eine zunehmende Rolle. Hier geht es im Grundsatz nicht um eine veränderte Nutzung des Materials, sondern darum, es durch eine defossilierte Alternative zu ersetzen. Zu nennen sind insbesondere Polyurethane auf Pflanzenöl-Basis, die Polymilchsäure (PLA), die Bio-Polyester (zum Beispiel Bio-PET) und die Naturfaser-Verbundwerkstoffe mit und

ohne biobasierte Matrix. Ford und Toyota gehörten zu den ersten OEMs, die PLA in ihren Fahrzeugen einsetzen, zum Beispiel in Sitzbezügen oder als Bodenbelag.³³

Chancen/Risiken aus CE-Perspektive

Biobasierte Kunststoffe bieten in verschiedenen Anwendungsbereichen interessante Entwicklungsmöglichkeiten, zum Beispiel mit Blick auf bioabbaubare Kunststoffe, die sich im Meer vollständig auflösen und nicht zu Mikroplastik zerfallen. Für den Automobilsektor bieten sie vor allem die Möglichkeit, sich unabhängiger von erdölbasierten Kunststoffen zu machen und damit vielleicht auch CO₂-Emissionen in der Fahrzeugherstellung zu reduzieren.

Grundsätzlich ließe sich ein Großteil der im Fahrzeug eingesetzten Kunststoffe durch biobasierten Kunststoff ersetzen. Hier ist es jedoch wichtig, auch im Bereich der biobasierten Kunststoffe genau zu differenzieren, zum Beispiel mit Blick auf die Ausgangsstoffe. Die ökobilanzielle Bewertung unterscheidet sich deutlich, wenn wie bei Produkten der ersten Generation extra Pflanzen angebaut werden müssen oder wie in der zweiten Generation ohnehin anfallende Reststoffe verwendet werden.

Gleichzeitig ist auch hier eine Kosten-Nutzen-Abwägung notwendig, da beispielsweise der energetische Aufwand zur Herstellung biobasierter Polymilchsäure (PLA) deutlich höher ist als der Aufwand für synthetisches Polyethylen (PE). Generell sollte bei biobasierten Kunststoffen der Verlust an Biodiversität und die Flächenkonkurrenz berücksichtigt werden. Das Joint Research Center der Europäischen Kommission hat in einer umfassenden Studie vorliegende Ökobilanzen zu Kunststoffen verglichen und kommt dabei zu der Einschätzung, dass biobasierte Kunststoffe nicht zwangsläufig als umweltfreundlicher einzuschätzen sind.³⁴ Allerdings ist dabei auch die in vielen Fällen noch nicht ausgereifte Produktionstechnik in Kleinanlagen zu berücksichtigen, die sich mit über Jahrzehnte optimierten Prozessen bei der Herstellung klassischer Kunststoffe vergleichen lassen muss. Grundsätzlich kann für viele biobasierte Kunststoffe schon heute von einem TRL 8–9 ausgegangen werden, häufig mangelt es jedoch an industriellen Produktionsanlagen.

Bezüglich der Ressourceneffizienz ist auch zu beachten, dass biobasierte Kunststoffe nicht generell eine bessere Recyclingfähigkeit besitzen und auch die Vielfalt dieser Kunststoffe zu Nachteilen führen kann. Aktuell beschäftigen sich zahlreiche Forschungsvorhaben mit der Optimierung biobasierter Kunststoffe, weshalb insgesamt

³² ACC 2022.

³³ Green Light 2020.

³⁴ Nessi et al. 2020.

festgehalten werden kann, dass noch hoher Forschungs- und Regulierungsbedarf besteht. Die Europäische Kommission hat Ende 2022 eine Mitteilung zum Thema „Bioplastik“ veröffentlicht, in der sie nochmals explizit darauf hinweist, dass solche Substitute für erdölbasierte Kunststoffe nicht per se nachhaltiger sein müssen, und weitere Schritte für eine transparentere Kommunikation angekündigt.³⁵

Status quo und Trend

Biobasierte Kunststoffe sind sowohl insgesamt als auch im Automobilssektor eher eine Nischenentwicklung mit extrem begrenzten Marktanteilen, insbesondere aufgrund der häufig deutlich erhöhten Materialkosten.

Wie dargestellt entwickelt sich die Forschung hier aber sehr dynamisch, unter anderem wird intensiv an der Nutzung von Algen als Ausgangsstoff für Kunststoffe geforscht. Der Automobilssektor könnte ein relevanter Motor der Entwicklung sein, wenn entsprechende Pilotprojekte zu einer konkreten Nachfrage und damit zur Möglichkeit der Skalierung von Produktionsanlagen führen würden.

Effekte auf die Wertschöpfungskette (räumlich, Arbeitsplatzeffekte)

Aussagen über die Veränderung von Wertschöpfungsketten sind jedoch noch mit sehr hohen Unsicherheiten verbunden. Grundsätzlich könnte die stärkere Verknüpfung mit dem Agrarsektor zu zusätzlichen Arbeitsplätzen führen; wo diese Arbeitsplätze entstehen würden, hängt jedoch erheblich von den Ausgangsmaterialien ab.

2.1.5 Leichtbau unter anderem durch Kunststoffeinsatz Technische Beschreibung und Wirkungsmechanismus

Viele OEMs betreiben Forschung zu möglichen Leichtbaumaterialien, da diese einen wesentlichen Ansatz zur Steigerung der Produkt- und Materialeffizienz darstellen. Es gibt bereits eine Vielzahl unterschiedlicher Materialien, die für den Leichtbau im Automobilssektor zum Einsatz kommen. Dazu gehören vor allem kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe (CFK). BMW hatte solche CFK-Module als eines der ersten Unternehmen im Automobilssektor unter anderem für die Gestaltung von Dachkonstruktionen in Sportversionen des M3 eingebaut.³⁶ Auch Innovationen im Bereich Stahl zählen zu den Leichtbaumaterialien. Ein Beispiel sind Sandwichstähle, sie sind ein Verbundwerkstoff aus Stahl und Kunststoff.

Chancen/Risiken aus CE-Perspektive

Der Einsatz von Leichtbaumaterialien zielt insbesondere auf geringeren Treibstoffverbrauch und damit auf die Reduktion von CO₂-Emissionen beziehungsweise Kosten in der Nutzungsphase.

Aus der Perspektive der Kreislaufwirtschaft sind bei dem Einsatz von Leichtbauverbundwerkstoffen jedoch die Vorzüge (zum Beispiel Emissionseinsparungen) durch verringerten Materialeinsatz mit den Risiken abzuwägen. So können beispielsweise eine reduzierte Recyclingfähigkeit und weitere Risiken (wie Verunreinigung mit anderen Materialien) bei Aufbereitungsprozessen bestehen.³⁷

Status quo und Trend

Leichtbaumaterialien werden derzeit überwiegend in hochpreisigen Fahrzeugen eingesetzt; ein klassisches Beispiel war Aluminium als Ersatz für deutlich schwerere Stähle.

Insgesamt war in der Vergangenheit jedoch ein stetig ansteigendes Gesamtdurchschnittsgewicht der in Verkehr gebrachten Fahrzeuge zu beobachten,³⁸ der Einsatz von Leichtbaumaterialien konnte hier den Trend zu immer größeren und immer besser ausgestatteten Fahrzeugen nicht kompensieren.

In Zukunft könnten additive Fertigungsverfahren, zum Beispiel mittels 3-D-Metall-Druck, Gewichtseinsparungen zumindest für einzelne Komponenten ermöglichen; aktuell sind diese Technologien aber speziell für sicherheitsrelevante Komponenten relativ weit entfernt vom Serieneinsatz in Fahrzeugen. Bereits in der Anwendung sind dagegen sogenannte „Giga Pressen“ für Karosserieteile aus Aluminium, wie sie unter anderem Tesla einsetzt. Diese ermöglichen die hoch präzise Produktion von Großteilen, die bisher aus bis zu 70 Einzelteilen gefertigt wurden, und könnten so bis zu fünf Prozent des Karosseriegewichts und ein Prozent der Produktionskosten einsparen.³⁹

Effekte auf die Wertschöpfungskette (räumlich, Arbeitsplatzeffekte)

Ähnlich wie die biobasierten Kunststoffe wird auch der weitere Einsatz von Leichtbaumaterialien nur zu begrenzten Veränderungen der Wertschöpfungskette führen. Die Serienproduktion solcher Materialien stellt besonders hohe Anforderungen an den Maschinenbau, wo Deutschland von seiner guten Marktpositionierung profitieren könnte.

³⁵ Europäische Kommission 2022a.

³⁶ VDI 2016.

³⁷ Material Economics 2018.

³⁸ anp management consulting 2020.

³⁹ Teslamag 2021.

Hinzu kommt im Bereich der Materialforschung die sehr gute Positionierung deutscher Forschungseinrichtungen, für den Automobilbau zum Beispiel die RWTH Aachen. Konzepte wie die oben dargestellten Groß-Pressen bei Tesla führen zu einer räumlichen Konzentration der Wertschöpfungskette, wenn alternativ vorgestanzte Teile von Zulieferern bereitgestellt werden.

2.2 Kreislaufhebel im Bereich Metalle

Im Vergleich zur Kreislaufführung von Kunststoffen sind entsprechende Konzepte für den Bereich Metalle bereits deutlich etablierter. Im Gegensatz zum Kunststoffrecycling gibt es bei den Metallen kaum relevante Qualitätsverluste, sodass Metallschrotte vergleichsweise einfach in den Produktionsprozess integriert werden können. Hinzu kommen die deutlich klareren ökonomischen Anreize, weshalb auch der Automobilsektor wo möglich auf Sekundärmetalle setzt.

2.2.1 Closed-Loop-Recycling

Technische Beschreibung und Wirkungsmechanismus

Speziell bei der Karosserie und anderen hoch sicherheitsrelevanten Komponenten werden im Automobilbereich extrem spezialisierte Stähle eingesetzt, die analog zu den Additiven bei Kunststoffen durch eine Vielzahl von speziellen Beimischungen noch einmal für ihre spezifischen Funktionen optimiert werden. Solche „advanced high strength steels“ können beispielsweise durch Legierung mit Niob so verstärkt werden, dass sie in dünnerer Blechdicke verbaut werden können.⁴⁰

Beim konventionellen Stahlrecycling werden solche Spezialstähle mit anderen Stahlsorten vermischt und recycelt; anschließend können sie aber nicht mehr für die gleichen hochwertigen Anwendungen wie zuvor genutzt werden. Eine Option ist es daher, auch bei der Gestaltung von Metallkomponenten im Fahrzeugbau auf einheitliche Qualitäten beziehungsweise spezielle Demontageroutinen zu achten, sodass sich tatsächlich geschlossene Stoffkreisläufe ergeben.

Chancen/Risiken aus CE-Perspektive

Wo die Schließung solch enger Stoffkreisläufe gelingt und die Qualität der Materialien möglichst vollständig erhalten bleibt, ergeben sich in der Regel auch die höchsten Einsparungen an CO₂ und Ressourcenverbräuchen.

Zu beachten sind hier allerdings möglicherweise anfallende Transportdistanzen, um mindestoptimale Mengen für separate Verwertungsprozesse an einem Standort zu poolen. Speziell bei schweren Komponenten könnten hier relevante CO₂-Emissionen anfallen. In der Regel sind solche Prozesse ökologisch hoch vorteilhaft, sie werden eher durch die Transportkosten verhindert.

Status quo und Trend

Insbesondere Spezialstähle im Fahrzeugbau werden zu meist aus Primärmaterialien hergestellt und die für die Legierungen verwendeten Rohstoffe gehen im Recyclingprozess in der Regel verloren.

Vor diesem Hintergrund gibt es Ansätze, beim Fahrzeugdesign etwa auf Speziallackierungen zu verzichten, die den Recyclingprozess weiter erschweren würden. Zugleich gibt es bei der Identifikation von Legierungen in der Analyse- und Sensortechnik ganz erhebliche Fortschritte, die die Sortierung in legierungsspezifische Einzelfraktionen erlauben würden.⁴¹

Effekte auf die Wertschöpfungskette (räumlich, Arbeitsplatzeffekte)

Ansätze eines legierungsspezifischen Recyclings in geschlossenen Stoffkreisläufen würden insbesondere die Notwendigkeit von Importen für einzelne Beimischungen reduzieren (zum Beispiel Niob). Insofern könnten solche Kreislaufwirtschafts-Hebel zu einer Stärkung der einheimischen Wertschöpfungsanteile führen, zumal die meisten stahlverarbeitenden Unternehmen bereits heute Metallschrotte für die Produktion einsetzen.

2.2.2 Rezyklatanteile

Der Ansatz „Secondary First“⁴² würde auch für Metalle zu einer weiteren Steigerung der Rezyklatanteile führen; notwendig wären dafür vor allem die oben dargestellten Ansätze der stärker geschlossenen Stoffkreisläufe, die aus einer Komponente wieder die gleichen Komponenten werden lassen.

Für die übrigen Betrachtungen sei hier auf Kapitel 2.1.1 verwiesen.

⁴⁰ Bhattacharya 2013.

⁴¹ Wuppertal Institut o. J.

⁴² Der „Secondary First“-Ansatz verfolgt den bevorzugten Einsatz von Sekundärmaterialien überall dort, wo die Qualität und die Verfügbarkeit der Materialien dies erlauben.

2.3 Batterien

Neben den Kernmaterialgruppen wie Metallen und Kunststoffen stehen einzelne Komponenten im Fokus verschiedener Hebel zur Förderung der Kreislaufwirtschaft. Das gilt etwa für die Katalysatoren bei Autos mit Verbrennungsmotor und die Batterien bei den elektrisch betriebenen Fahrzeugen, in denen die sowohl besonders umweltkritischen als auch wertvollen Rohstoffe wie Palladium/Platin (beim Kat) beziehungsweise Lithium (in der Batterie) konzentriert sind.

In beiden Fällen ist eine separate Demontage und hochwertige Anlagentechnik für das entsprechende Recycling notwendig. Zugleich ist der Wert der enthaltenen Rohstoffe auch Akteuren jenseits des offiziellen Recyclingregimes bekannt, sodass auch kriminelle Aktivitäten berücksichtigt werden müssen: Speziell beim Kat gibt es Wege, durch Einsatz von Chemikalien zumindest einen Teil des Palladiums zu entnehmen, allerdings unter massiven Umweltbelastungen und damit zum Beispiel in afrikanischen Ländern im Widerspruch zu geltenden Umweltgesetzen.

Im Folgenden sollen mit Recycling, 2nd use und Refabrikation (engl. Remanufacturing) von Batterien drei Ansätze vorgestellt werden, die nicht losgelöst voneinander betrachtet werden können, sondern die Notwendigkeit integrierter Konzepte hervorheben: Eine verlängerte Nutzungsdauer von Batterien führt beispielsweise dazu, dass sie erst später für ein Recycling zur Verfügung stehen.

2.3.1 Recycling von Traktionsbatterien

Technische Beschreibung und Wirkungsmechanismus

Für die Rückgewinnung von in Traktionsbatterien (Antriebsbatterien) enthaltenen Rohstoffen wurden in den vergangenen Jahren komplexe Recyclingprozesse entwickelt, die insbesondere die kritischen Rohstoffe wie Lithium oder Kobalt zu relevanten Anteilen (je nach Rohstoff bis zu 90 Prozent) einer erneuten Nutzung zuführen könnten. Entscheidend dafür ist jedoch die Rückführung der Batterien in hochwertige Verwertungsprozesse inklusive einer aufwändigen Demontage. Vor allem defekte Batterien gelten als hochgefährlich, da giftige Gase austreten können oder Explosionsgefahr besteht, sie müssen deshalb als Sondermüll entsorgt werden. Ein Recycling ist daher nur unter hohen Sicherheitsvorkehrungen möglich.⁴³

Im ersten Schritt müssen die Batterien in ihre Einzelteile zerlegt werden, dies passiert in der Regel durch einen

Schredderprozess; alternative Prozesse sind aktuell in der Entwicklung. Im zweiten Schritt werden die so aufbereiteten Metalle verschiedenen hydro- beziehungsweise pyrometallurgischen Verfahren unterzogen. Zentral für die CO₂-Bilanz ist dabei die Rückgewinnung möglichst vieler Rohstoffe – gelingt es beispielsweise, auch Graphit und Lithium zurückzugewinnen, lassen sich 8,1 Tonnen CO₂ pro Tonne recycelter Batterien im Vergleich zur Primärgewinnung der Rohstoffe einsparen.⁴⁴

Ein Großteil der in Traktionsbatterien eingesetzten Rohstoffe ist gut recycelbar, prinzipiell könnten bis zu 95 Prozent der relevanten Funktionsmaterialien Kobalt, Nickel und Kupfer zurückgewonnen werden,⁴⁵ – angesichts der damit verbundenen Kosten kommen die dafür notwendigen Technologien jedoch noch nicht flächendeckend zum Einsatz, dies gilt besonders für das nicht-europäische Ausland. Bei entsprechender Skalierung und Prozessoptimierung könnte Recycling jedoch 2030 circa zehn Prozent der Nachfrage nach wichtigen Batteriematerialien und -stoffen bereitstellen, bis 2050 könnte dieser Wert auf etwa 40 Prozent ansteigen, je nach Markthochlauf sowie Entwicklung von Marktanteilen der Elektromobilität und Zellchemien.⁴⁶

Chancen/Risiken aus CE-Perspektive

Würde es gelingen, die Rückgewinnungsraten für die Schlüssel-Rohstoffe aus Batterien tatsächlich auf 90 Prozent für Nickel und Kobalt und 85 Prozent für Lithium (jeweils in Batteriequalität) zu optimieren und gleichzeitig die Erfassungsquote von heute etwa einem Drittel auf 90 Prozent zu erhöhen, könnten nach Modellierungen des Wuppertal Instituts im Rahmen der Circular Economy Initiative Deutschland bis zum Jahr 2030 insgesamt 8.100 Tonnen Lithium, 27.800 Tonnen Kobalt und 25.700 Tonnen Nickel zurückgewonnen werden. Damit könnte durch Recycling Lithium für 1,3 Millionen (2030) beziehungsweise 17,7 Millionen (2050) zusätzliche E-Fahrzeuge bereitgestellt werden. Diese Mengen würden ab 2030 noch deutlich ansteigen, wenn immer mehr Elektrofahrzeuge außer Betrieb gesetzt werden.

Die Menge an Lithium, Kobalt und Nickel entspricht bei aktuellen Preisen einem wirtschaftlichen Wert von 1,2 Milliarden Euro bis 2030 beziehungsweise 13,8 Milliarden Euro bis 2050. Sie würde den Bedarf an Lithium für Battery Electric Vehicle (BEV) bis zum Jahr 2030 zu etwa 13 Prozent abdecken, bis zum Jahr 2050 – angesichts der dann verstärkt ausfallenden Altfahrzeuge – zu etwa 39 Prozent.

⁴³ Schulz 2020.

⁴⁴ Screening LCA, Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik iWF, Technische Universität Braunschweig, LCA Duesenfeld Prozess, Prof. Dr. Christoph Herrmann.

⁴⁵ Volkswagen AG 2019.

⁴⁶ Buchert 2019.

Offen ist die Frage der weiteren technologischen Entwicklung und der damit verbundenen Veränderungen der Rohstoffbedarfe: Aktuell zeigt sich, dass neue Batterietypen weniger Kobalt, dafür aber deutlich mehr Nickel beanspruchen.

Mit Blick auf den Klimaschutz könnte das Recycling bis zum Jahr 2050 – unter Berücksichtigung der notwendigen Energie- und Ressourcenaufwendungen für den Rückgewinnungsprozess – Energie-Einsparungen ermöglichen, die beim aktuellen Strommix in Deutschland CO₂-Emissionen von etwa 36 Millionen Tonnen beziehungsweise etwa zehn Prozent der bei der Herstellung von Fahrzeugbatterien entstandenen CO₂-Emissionen einsparen würden. 2022 kündigten verschiedene Hersteller den Aufbau von Produktionskapazitäten für Natrium-Ionen-Batterien an, die auf das besonders klima- und ressourcenrelevante Lithium verzichten könnten. Die Recyclingfähigkeit könnte dann davon profitieren, dass Lithium nicht weiterhin in immer kleineren Mengen eingesetzt wird.

Status quo und Trend

Trotz der dargestellten Potenziale ist zu berücksichtigen, dass die technisch mögliche Rückgewinnung von Lithium in den vergangenen Jahren aufgrund günstiger Primärrohstoffpreise noch unwirtschaftlich war. Die Kreislaufführung wird zudem durch die Tatsache erschwert, dass es eine Vielzahl unterschiedlicher Batterietypen auf dem Markt gibt, sodass kein einheitlicher Recyclingprozess möglich und das Verwerten der Batterien zeitaufwändig und teuer ist.

Angesichts der zahlreichen Aktivitäten in Forschung und Entwicklung zum Thema Batterierecycling,⁴⁷ sind auch in der wissenschaftlichen Literatur verschiedenste Angaben dazu zu finden, zu welchen Anteilen Rohstoffe wie Lithium, Kobalt oder Nickel in einem optimierten Recyclingsystem zurückgewonnen werden könnten. Hier ist es daher eindeutig der regulatorische Impuls aus der EU-Batterie-Verordnung⁴⁸, die erstmals konkrete Rückgewinnungsquoten für einzelne Rohstoffe vorschreibt, die mit noch relativ langen Übergangsfristen zu erreichen sein werden. Gleichzeitig sieht die Verordnung die verpflichtende Kennzeichnung von Batterien hinsichtlich der enthaltenen Rohstoffe und ihrer chemischen Zusammensetzung vor, sodass Batterien zielgerichteter den jeweils optimalen Recyclingverfahren zugeführt werden könnten.

Effekte auf die Wertschöpfungskette (räumlich, Arbeitsplatzeffekte)

Für den Standort Deutschland könnte ein so optimiertes zirkuläres System für Traktionsbatterien mit zahlreichen Vorteilen verbunden sein: Insbesondere könnte „eine größere Wertschöpfungstiefe entlang der Batteriewertschöpfungskette im Binnenmarkt erreicht werden, gefolgt von höherem Bruttoinlandsprodukt und höherer Resilienz der deutschen Industrie.“⁴⁹

Im Fokus stünde dabei vor allem eine höhere Versorgungssicherheit beziehungsweise geringere Abhängigkeit von globalen Materialimporten. Gerade Lithium ist gekennzeichnet durch eine hohe geografische Konzentration auf einzelne Länder, die dies in der Zukunft durch Steuern und Exportregulierungen ausnutzen könnten. Der Abbau ist ähnlich wie bei den Seltenen Erden mit erheblichen Umwelt- und Gesundheitsrisiken verbunden, sodass selbst eine Identifizierung entsprechender Vorkommen in Europa nicht bedeuten würde, dass diese auch tatsächlich erschlossen werden könnten. Das Recycling selbst ist angesichts der oben dargestellten Schritte differenziert zu betrachten: Die Demontage wäre sicherlich arbeitsintensiv, das Recycling selbst wird auch in Zukunft in Großanlagen mit begrenztem Personaleinsatz stattfinden.

2.3.2 2nd use für Traktionsbatterien

Technische Beschreibung und Wirkungsmechanismus

Lithium-Ionen-Batterien können typischerweise in batteriebetriebenen Fahrzeugen genutzt werden, bis ihre Leistungs- und Speicherkapazität auf etwa 80 Prozent abgesunken ist.⁵⁰ Auch mit dieser reduzierten Leistungsfähigkeit sind noch zahlreiche andere Anwendungen vorstellbar, für die diese Batterien in einer zweiten Nutzungsphase eingesetzt werden könnten: „Daher überrascht es nicht, dass ein großes Interesse und Potenzial für weniger energieintensive Anwendungen besteht, zum Beispiel für Wohngebäude, unterbrechungsfreie Stromversorgung, Kehrmaschinen und fahrerlose Transportfahrzeuge“⁵¹. Aktuell wird auch der Einsatz für dezentrale Schnellladestationen geprüft.

Chancen/Risiken aus CE-Perspektive

Aus Kreislauf- und Ressourcenperspektive reduziert die Nutzung von Traktionsbatterien in Zweitverwendungen den Bedarf an neuen Batterien, deren Produktion einen erheblichen Netto-CO₂- und Materialfußabdruck verursachen würde – im Rahmen der CEID Arbeitsgruppe wurde

⁴⁷ Melin et al. 2019.

⁴⁸ Europäische Kommission 2020a.

⁴⁹ Elsner et al. 2021, S. 34.

⁵⁰ Bobba et al. 2019.

⁵¹ Bobba et al. 2019, S. 279.

ein kumulierter Energieaufwand (KEA)⁵² von 1.200 MJ pro kWh Batterie-Kapazität angenommen.⁵³ Im Kern handelt es sich also um eine Wiederverwendung beziehungsweise eine Kaskadennutzung, im Sinne der Abfallhierarchie damit um Abfallvermeidung, die einem Recycling grundsätzlich vorzuziehen wäre. Betrachtet man ein sehr optimistisches Szenario mit 50 Prozent der Batterien, die einer solchen Zweitnutzung zugeführt werden, könnten sich im Zeitraum 2020–2050 Einsparungen des KEA von 655 PJ (73 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalente) ergeben, was etwa 1.300 Milliarden Kilometer Fahrleistung mit einem leichten Elektrofahrzeug entsprechen würde – das ist das Doppelte der Fahrleistung aller PKW in Deutschland im Jahr 2018.

Dabei müssen jedoch auch potenzielle Risiken betrachtet werden: Die Batteriekapazität wird auch in einer solchen zweiten Nutzung weiter abnehmen, zudem wurde das Batteriedesign nicht auf eine solche Anwendung ausgelegt. Mit fortschreitenden Verbesserungen bei der Batterieproduktion wäre irgendwann zu überlegen, wie effizient der Einsatz solcher Gebrauchtteile tatsächlich sein kann.

Ein schwerwiegendes Problem ist vor allem die dezentrale Verteilung in unterschiedlichste Anwendungsfälle, bei der ohne umfassende Erfassungssysteme (die aktuell noch nicht einmal in der Planung sind) sehr schnell niemand mehr genau sagen kann, wo Batterien genutzt werden – damit wird eine Sammellogistik für das Recycling erheblich erschwert. Die letztendliche Erfassungsquote wird signifikant von der tatsächlichen Nutzung abhängen (zum

Beispiel im privaten Haushalt oder in industriellen Anwendungen) und von Rahmenbedingungen wie der möglichen Einführung eines Pfands auf Batterien. Denn es besteht das Risiko, dass Batterien einer nicht ordnungsgemäßen Entsorgung zugeführt werden und damit die enthaltenen Rohstoffe verloren gehen.

Status quo und Trend

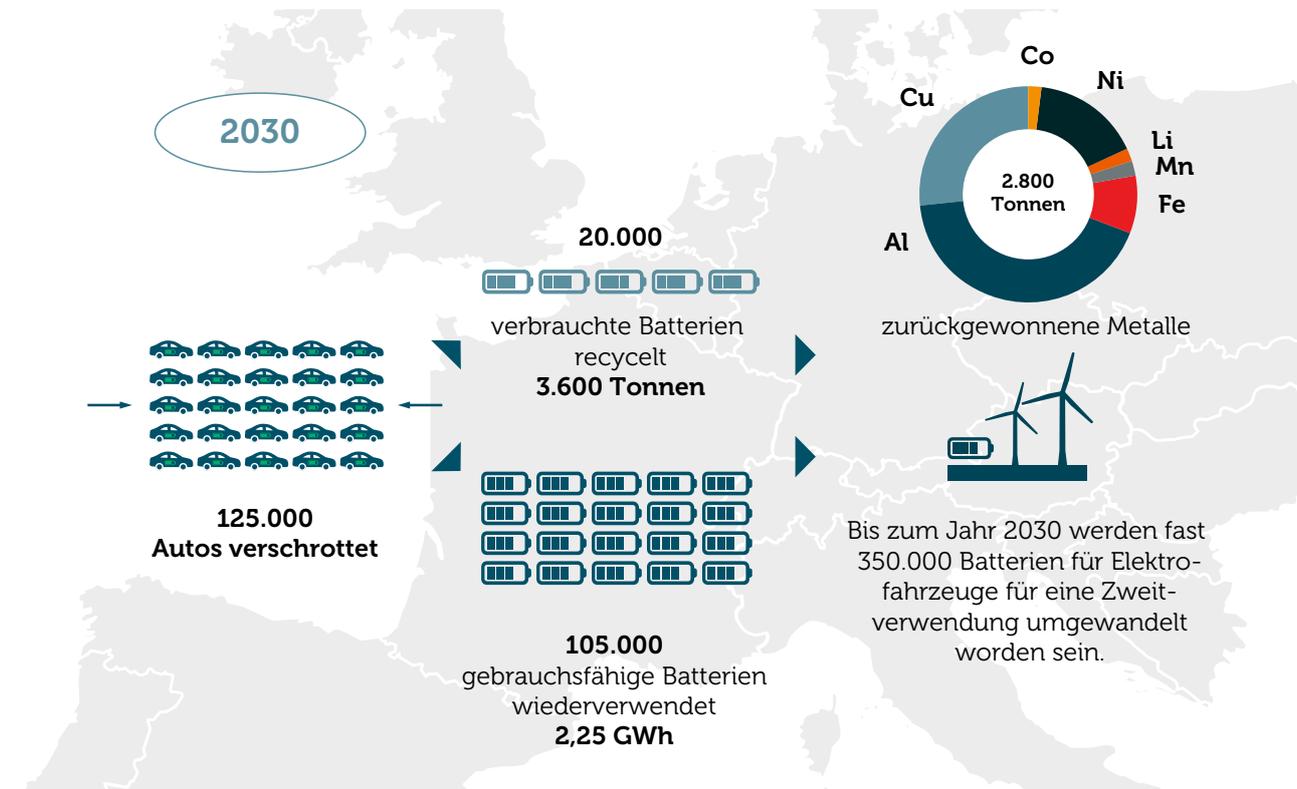
Da erst jetzt die ersten Elektrofahrzeuge beziehungsweise ihre Traktionsbatterien das Ende ihrer Nutzungsphase erreichen, ist aktuell kaum seriös abschätzbar, zu welchen Anteilen Lithium-Ionen-Batterien tatsächlich Zweitverwendungen zugeführt werden. In der Literatur gibt es hierzu extrem abweichende Annahmen, sie reichen von 85 Prozent (elementenergy, vgl. Abbildung 8) bis hin zur Einschätzung, dass sich die Nachfrage nach Zweitnutzungen auf eine extrem begrenzte Anzahl von technisch umfassend qualifizierten Speicheranwendungen beschränkt. Studien zur Marktrelevanz weisen unter anderem darauf hin, dass bei Abschätzungen für Zweitanwendungen Unsicherheiten über die tatsächliche Nachfrage existieren: „[...] es besteht das Risiko, dass solche Anwendungen überflüssig werden, wenn die verfügbaren Mengen an gebrauchten EV-Batterien größer werden“⁵⁴. Allerdings könnten sich durch die neuen Vorgaben der Batterieverordnung unter anderem infolge der verpflichtenden Kennzeichnung zu Kapazität, Performance und Lebensdauer der Batterie entsprechende Geschäftsmodelle zur Zweitnutzung schneller rentieren, da solche zentralen Faktoren nicht erst separat erhoben werden müssen.

⁵² KEA = Kumulierter Energieaufwand, nach VDI-Richtlinie 4600 definiert als „die Gesamtheit des primärenergetisch bewerteten Aufwands, der im Zusammenhang mit der Herstellung, Nutzung und Beseitigung eines ökonomischen Guts (Produkt oder Dienstleistung) entsteht beziehungsweise diesem ursächlich zugewiesen werden kann“.

⁵³ Vgl. CEID 2020.

⁵⁴ Kurdve et al. 2019, S. 14.

Abbildung 8: Szenario mit extrem hohem Anteil an Batterien in einer Zweitnutzung



Quelle: elementenergy S. 3, eigene Übersetzung

Effekte auf die Wertschöpfungskette (räumlich, Arbeitsplatzeffekte)

Wie immer bei Maßnahmen der Abfallvermeidung sind mögliche Effekte auf die Wertschöpfungskette komplex und schwer absehbar: 2nd use würde zu erheblichen Kosteneinsparungen für Akteure führen. Anstatt eine neue Batterie kaufen zu müssen, könnten sie auf eine Gebrauchtvvariante zurückgreifen, zum Beispiel Hausbesitzer oder öffentliche Unternehmen im ÖPNV-Bereich (siehe Abschnitt 2.3.3).

Umgekehrt würde die Wiederverwendung die Nachfrage nach jenen Batterietypen reduzieren, die für stationäre Anwendungen mit niedrigeren Anforderungen an die Leistungsfähigkeit beziehungsweise Energiedichte konzipiert werden würden. Allerdings ist festzuhalten, dass diese Batterien nur zu relativ geringen Anteilen in Deutschland produziert werden. Bei den Prognosen zu benötigten Speicherkapazitäten im Rahmen einer globalen Energiewende sind hier keine wirklichen Risiken für Nachfrageausfälle zu befürchten.

2.3.3 Refabrikation von Batterien

Technische Beschreibung und Wirkungsmechanismus

Neben der Verwendung von Batterien für andere Zwecke ist ein noch näher liegender Ansatz die verlängerte Nut-

zungsdauer der Batterien für ihren ursprünglichen Zweck durch ein Refurbishment. Dieser Hebel setzt an, bevor die Batterie so weit an Kapazität verloren hat, dass sie für ihren eigentlich Zweck nicht mehr nutzbar ist.

Hierfür werden in der Regel einzelne Zell-Module entnommen und ausgetauscht. Unter anderem Daimler hat hierzu bereits 2011 ein entsprechendes Verfahren patentiert und garantiert für die aufbereiteten Batterien eine Laufleistung von weiteren 160.000 Kilometern.

Chancen/Risiken aus CE-Perspektive

Analog zur zukünftigen Marktrelevanz von 2nd-use-Anwendungen finden sich in der Literatur sehr unterschiedliche Einschätzungen zum Thema Instandsetzung, sowohl zur Marktrelevanz als auch zu den damit verbundenen Einspareffekten.

So wurden beispielsweise in einer Studie die ökonomischen und ökologischen Effekte einer Refabrikation von Batterien aus Elektrofahrzeugen abgeschätzt und dabei eine Verringerung des KEA pro kWh Batteriekapazität von 224,1 MJ berechnet – das entspräche einer theoretischen Reduktion des Energiebedarfs von etwa 20 Prozent gegenüber den hier verwendeten Annahmen für die Primärproduktion einer Batterie.⁵⁵ Unter anderen Annahmen

⁵⁵ Kampker et al. 2016.

zur weiteren Lebensdauer der Batterien nach der Instandsetzung kommen Richa et al. zu 49 Prozent Einsparungen des KEA,⁵⁶ eine im Rahmen des Forschungsprojekts LiBRI durchgeführte Lebenszyklusanalyse (Life cycle assessment, LCA) zeigt, dass bei einem Zellaustausch von nur fünf Prozent Einsparungen von 95 Prozent THG-Emissionen erreicht werden können.⁵⁷

Status quo und Trend

Ebenso wie beim Recycling und der Option alternativer Verwendungen spielt auch die Refabrikation von Traktionsbatterien bislang noch keine relevante Rolle, da aktuell nur wenige Batterien in ihrer Ladekapazität soweit abgesunken sind, dass sich der notwendige Aufwand für die Wiederaufbereitung lohnen würde.

Die zukünftige Entwicklung wird massiv davon abhängen, wie von politischer Seite die Rahmenbedingungen gesetzt werden beziehungsweise welcher der drei hier dargestellten Kreislaufwirtschaftshebel sich am ehesten rechnen wird. Ein weiterer zentraler Faktor ist die Innovationsdynamik der Batterien: Sollten beispielsweise Feststoffbatterien⁵⁸ doch früher eingeführt werden, könnten disruptive Innovationen dazu führen, dass der Anreiz zur Wiederaufbereitung der alten Batterie-Typen drastisch reduziert würde.

Effekte auf die Wertschöpfungskette (räumlich, Arbeitsplatzeffekte)

Mit Blick auf die Wertschöpfungspotenziale entstehen durch die Wiederaufbereitung der Batterien signifikante Kosteneinsparpotenziale. Am Beispiel der Lithium-Ionen-Batterie eines Chevrolet Volt wurden sie auf 40 Euro/kWh gegenüber einer neuen Batterie geschätzt, mit steigenden Skaleneffekten könnten diese Einsparungen auf bis zu 60 Euro/kWh gesteigert werden, was einer Einsparung von einem Drittel gegenüber einer Neubatterie entsprechen würde.⁵⁹ Sowohl im Bereich der Batterieherstellung als auch beim Refabrikations-Prozess waren in den vergangenen Jahren äußerst dynamische Preisentwicklungen zu beobachten: Für die Batteriekosten war das Joint Research Center der Europäischen Kommission (JRC) noch 2017 von Kosten von 215 Euro/kWh ausgegangen,⁶⁰ zwei Jahre später veröffentlichte Prognosen gingen für das Jahr 2030 von nur noch etwa 55 Euro/kWh aus.⁶¹

Die Refabrikation wäre speziell im Vergleich zum Recycling mit Sicherheit mit deutlich positiven Arbeitplatzeffekten verbunden: Sowohl die Demontage als auch die Analyse der Altbatterien erfordert spezifische Expertise und manuelle Fähigkeiten. Unklar ist jedoch die räumliche Verteilung: Angesichts der hohen Lohnkostenanteile wäre es auch bei Batterien denkbar, dass sie für die Wiederaufbereitung nach Asien transportiert werden, wie es bereits heute bei hochwertigen Elektrogeräten der Fall ist.

2.4 Reifen und Elektronikkomponenten

Neben den oben dargestellten Batterien bieten noch weitere Komponenten Ansatzpunkte für eine verstärkte Zirkularität. Im Folgenden liegt der Fokus auf Reifen und den zunehmend eingesetzten elektronischen Bauteilen in Fahrzeugen. Die ausgewählten Hebel wären in angepasster Form auch auf andere Komponenten übertragbar, zum Beispiel Stoßdämpfer oder Sitzsysteme.

2.4.1 Einsatz biobasierter Alternativmaterialien zum synthetischen Kautschuk

Technische Beschreibung und Wirkungsmechanismus

Konsistenz ist eine der Kernstrategien einer nachhaltigen Kreislaufwirtschaft, in ihrem Sinn wird versucht, synthetischen Kautschuk als Rohstoff für die Reifenherstellung durch biobasierte Alternativ-Materialien zu ersetzen. Diverse aktuelle Forschungsvorhaben und Pilotprojekte untersuchen, welche alternativen/nachwachsenden Kautschukarten sich für die Reifenherstellung eignen. Mögliche Alternativen sind zum Beispiel die Guayule-Pflanze oder die Löwenzahn-Wurzel.

Chancen/Risiken aus CE-Perspektive

Beim Vergleich von Reifen aus Kautschuk und solchen aus Löwenzahn-Wurzeln wird deutlich, dass sich die CO₂- und THG-Emissionen prinzipiell durch kürzere Transportwege reduzieren lassen, da Löwenzahn in der Nähe von Industriegebieten wachsen könnte; bislang werden in den meisten dieser Projekte jedoch importierte Mengen eingesetzt. Derzeit können auch nur 15 Prozent der Pflanze für die Herstellung von Kautschuk verwendet werden, sodass große Abfallmengen entstehen, was wiederum der Ressourceneffizienz widerspricht. Weitere Forschung über die mögliche Verwendung dieser Abfallstoffe könnte dieses Hindernis minimieren.

⁵⁶ Richa et al. 2015.

⁵⁷ Daimler AG 2014.

⁵⁸ Feststoffkörperbatterien unterscheiden sich von aktuellen Batterietypen dadurch, dass für den Ionen-Transport keine Flüssigkeit zum Einsatz kommt, sondern ein festes, elektrisch leitfähiges Material. Damit wären deutlich höhere Energiedichten möglich.

⁵⁹ Kampker et al. 2016.

⁶⁰ Tsiropoulos 2018.

⁶¹ Goldie-Scot 2019.

Generell gilt, dass alternative Kautschukarten den Einsatz von Erdöl vermeiden oder weiter reduzieren können. Im Moment decken synthetische Kautschuke 60 Prozent des weltweiten Bedarfs ab, es ist unklar, ob und wie sich der Anteil natürlicher Kautschuksorten steigern lassen könnte.⁶² Die tatsächliche Skalierbarkeit dieser Produktionsprozesse, der damit verbundene Flächenverbrauch und die Konkurrenz zur landwirtschaftlichen Nutzung sind Aspekte, die aktuell noch intensiv beforscht werden.

Status quo und Trend

In Deutschland forscht insbesondere der Reifenhersteller Continental intensiv an der Alternative für die Kautschukherstellung aus Löwenzahn-Wurzeln (Taraxagum), er wurde hierfür unter anderem mit dem Nachhaltigkeitspreis 2021 ausgezeichnet. Basis der aktuellen Forschung sind russische Untersuchungen aus den 30er Jahren. Besonders der „Russische Löwenzahn“ ist als Alternative zum Kautschukbaum Hevea geeignet. 2014 präsentierte das Unternehmen die ersten Taraxagum-Versuchsreifen und im Jahr 2018 wurde das Forschungslabor „Taraxagum Lab Anklam“ in Mecklenburg-Vorpommern eröffnet, in dem rund 20 Mitarbeiter*innen an Kautschuk-Alternativen forschen.⁶³ Zudem hat Continental zusammen mit Michelin und SMAG ein Joint Venture gegründet, das durch transparente Lieferketten die Nachhaltigkeit in der Naturkautschukindustrie steigern soll.⁶⁴

Insgesamt ist das aber noch eine Nischenentwicklung, die aktuell deutlich weniger als ein Prozent des Markts abdeckt; Kautschuk-Alternativen werden bislang hauptsächlich für Fahrradreifen eingesetzt. Die aktuell noch häufig prohibitiv hohen Kosten sollen durch bessere industrielle Fertigungsverfahren sinken und die Gesamteffizienz soll steigen.

Effekte auf die Wertschöpfungskette (räumlich, Arbeitsplatzeffekte)

Der Einsatz biobasierter Materialalternativen könnte zu einer Regionalisierung der Wertschöpfungskette beitragen, sodass insbesondere Importe aus Südamerika ersetzt werden könnten. Gleichzeitig ist jedoch unklar, ob in Europa tatsächlich ausreichend Fläche für den Anbau zur Verfügung stünde.

Positive Effekte könnten insbesondere an der Schnittstelle zu einer regionalen Landwirtschaft entstehen, wenn hier entsprechende Synergien geschaffen würden.

2.4.2 Vertiefte Demontage von Elektronikkomponenten Technische Beschreibung und Wirkungsmechanismus

Fahrzeuge werden zunehmend mit elektronischen Bauteilen ausgestattet, die teilweise strategische und/oder kritische Metalle mit hoher Umweltrelevanz wie Gold, Silber, Palladium, Tantal und Seltene Erden enthalten. Diese Metalle werden zurzeit im Altfahrzeugdemontagebetrieb oder nach dem Schreddern der Restkarossen gewöhnlich nur sehr beschränkt oder gar nicht zurückgewonnen.

Eine vertiefte Demontage einzelner Komponenten könnte die Voraussetzung dafür schaffen, dass diese Komponenten einem spezifischen Recycling zugeführt werden, bei dem die Rohstoffe zurückgewonnen werden. Insgesamt werden beispielsweise in einem hochwertiger ausgestatteten Mittelklassewagen über 200 g des Seltene-Erden-Metalls Neodym verbaut, relevant sind hier unter anderem:⁶⁵

- Magnete: In einem Mittelklassewagen sind heute etwa 20 Elektromotoren enthalten, deren Magnete Seltenerdoxide enthalten (zum Beispiel in Schaltungen, Kraftübertragung, Bremsen, Lautsprecher, Diebstahlsicherung, Türen und Steuerung).
- Leiterplatten: Daneben enthält ein Mittelklassewagen etwa 50 bis 100 Steuergeräte, die alle mit Gold, Silber und Palladium bestückte Leiterplatten enthalten.
- LCD-/LED-Anzeigen enthalten Indium-Zinn-Oxid (ITO); pro Stück in geringen Mengen (etwa 0,08 mg/cm²), aber mit stark ansteigender Tendenz.

Chancen/Risiken aus CE-Perspektive

Die Kreislaufführung solcher kritischen Rohstoffe ist aus zwei Gründen von zentraler Bedeutung:

- Zum einen ist ihre Primärgewinnung mit enormen Umweltbelastungen verbunden; zum Beispiel bei verschiedenen Seltenen Erden mit radioaktiv belasteten Abraumengenen. Das Recycling beziehungsweise der Einsatz von Sekundärmaterialien ist häufig mit deutlich niedrigeren Ressourcenverbräuchen verbunden.
- Zum anderen ist die Verfügbarkeit dieser Rohstoffe (aus unterschiedlichsten Gründen) begrenzt; sie werden jedoch für viele Schlüsseltechnologien des Umweltschutzes dringend benötigt, zum Beispiel werden Seltene Erden in der Windkraft eingesetzt oder Palladium in Katalysatoren. Eine verbesserte Rückgewinnung dieser Rohstoffe würde auch einen relevanten Beitrag zur Steigerung der Versorgungssicherheit und zu einer reduzierten Abhängigkeit insbesondere von Importen aus China darstellen. Magnete sind mit etwa 30 Prozent der wichtigste Einzelanwendungsbereich der kritischen Rohstoffe.

⁶² Krasnushkina 2017.

⁶³ Westfälische Wilhelms-Universität Münster 2018.

⁶⁴ Continental AG 2019.

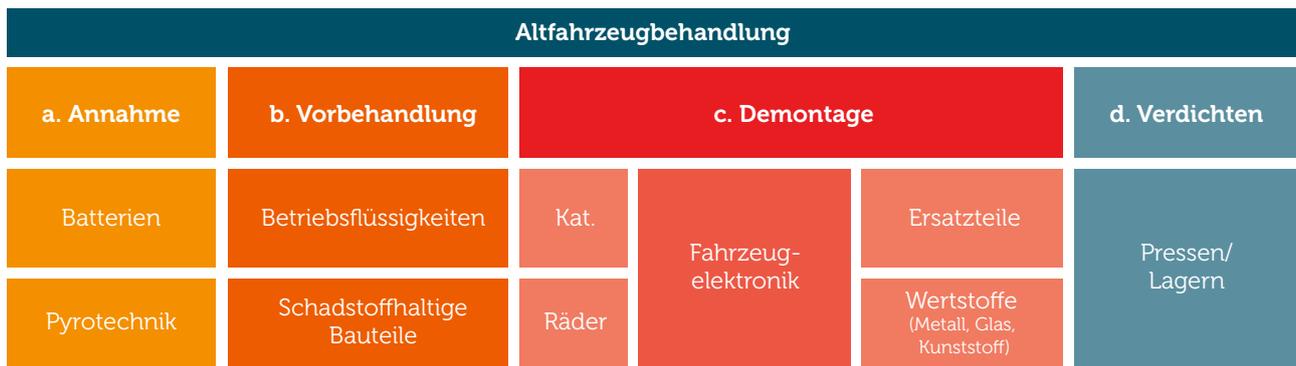
⁶⁵ Groke et al. 2017.

Status quo und Trend

In Deutschland existieren bezüglich der Rückgewinnung kritischer und umweltrelevanter Metalle aus Altfahrzeugen weder Zielvorgaben noch spezialisierte Demontagemethoden, ausreichende logistische Systeme oder Reststoffmärkte, die einen hohen Grad von Rückgewinnung der weiter wachsenden Beträge von wirtschaftlich strategischen Metallen aus Altfahrzeugen in der Zukunft ermöglichen würden.

Herkömmliche Behandlungsmethoden für Altfahrzeuge (Schreddern von Restkarossen nach dem Entfernen von Störstoffen und teilweiser Demontage von Gebrauchtteilen, vgl. Abb. 9) sind nicht darauf ausgerichtet, die meisten der strategischen Metalle zu separieren. Ohne eine solche separate Demontage geht die Metallfraktion anschließend in den Schredder, wo Rohstoffe wie Neodym dissipativ verteilt werden und damit für ein Recycling praktisch verloren sind.

Abbildung 9: Ablauf der Altfahrzeugbehandlung und Einbettung der Separation der Fahrzeugelektronik



Quelle: Groke et al. 2017, S. 29

Systematische Informationen über die Trennung von relevanten Komponenten aus Altfahrzeugen mit dem Ziel der stofflichen Verwertung von strategischen Metallen sind nach Analysen im Auftrag des Umweltbundesamtes nur im begrenzten Umfang verfügbar.⁶⁶

Effekte auf die Wertschöpfungskette (räumlich, Arbeitsplatzeffekte)

Eine vertiefte Demontage von Fahrzeugen wird für viele der hier dargestellten Hebel eine Schlüsselvoraussetzung sein und wäre absehbar mit einer Vielzahl neuer Arbeitsplätze verbunden. Vor diesem Hintergrund hat das Forschungs-Projekt ORKAM⁶⁷ analysiert, für welche Komponenten die Demontage bereits heute einen ökonomischen Nettonutzen erzielen könnte. Dazu gehören aus der Gruppe der Motoren zum Beispiel das Heizungsgebläse und die Lichtmaschine, aus der Gruppe der Steuerungen Motor-/Getriebesteuerung, Inverter, Fahrtsteuerung, Start-Stopp-Steuerung und aus der Gruppe der Sensoren der Sauerstoffsensor. Bei insgesamt 19 Komponenten wurde jedoch keine Wirtschaftlichkeit festgestellt, beispielsweise bei kleinen Motoren, Navigationsgeräten, Klimasteuerung, Verteilerbox, Beleuchtung. Das liegt unter anderem daran, dass Informationen über die Lokalisierung im Fahrzeug und die Vielfalt der eingesetzten

Komponenten fehlen, was eine standardisierte Demontage behindert.

Insgesamt betrug der Materialerlös über alle im Projekt zerlegten 121 Komponenten im Durchschnitt 0,96 € je Komponente, dem stand der Separationsaufwand mit Personalkosten in Höhe von 0,58 €/min entgegen. Bei entsprechender Planung und insbesondere wegen der stetig steigenden Anzahl von Elektronikkomponenten pro Fahrzeug könnte sich hier ein relevantes Betätigungsfeld entwickeln. Analysen unter Beteiligung des Wuppertal Institut zeigen jedoch, dass noch massiver Handlungsbedarf besteht, zum Beispiel bei der Integration in Ausbildungsinhalte.⁶⁸

2.5 Neue Nutzungsformen

Das Konzept der Kreislaufwirtschaft lässt sich wie in Kapitel 1 dargestellt unterschiedlich breit definieren, umfasst im Kern aber nicht nur die Produktionsweise eines Produkts – hier eines Fahrzeugs –, sondern auch die Nutzungsform. Insofern lässt sich Kreislaufwirtschaft im Kontext Automobil nicht sinnvoll diskutieren, wenn nicht zugleich Alternativen zur Individualmobilität in Betracht gezogen werden. Gleichzeitig zeigt sich auch an diesem konkreten Beispiel, dass damit die Abgrenzung des-

⁶⁶ Groke et al. 2017.

⁶⁷ Optimierung der Separation von Bauteilen und Materialien aus Altfahrzeugen zur Rückgewinnung kritischer Metalle (ORKAM).

⁶⁸ Wuppertal Institut 2020.

sen, was eigentlich Kreislaufwirtschaft ausmacht, immer schwieriger wird – viele der in diesem Zusammenhang zu betrachtenden Aspekte fallen mindestens genauso auch in den Bereich des nachhaltigen Konsums. Es gibt also große inhaltliche Überlappungen, teilweise aber andere Schwerpunktsetzungen oder Bewertungskriterien.

2.5.1 Carsharing

Technische Beschreibung und Wirkungsmechanismus

Im durchschnittlichen deutschen Haushalt entstehen etwa elf Prozent des Rohstoffaufwandes durch Mobilität, der Anteil an den Treibhausgasemissionen liegt sogar bei 20 Prozent.⁶⁹ Neben der Diskussion um zirkuläre Fahrzeuge, Elektromobilität oder das autonome Fahren haben sich unterschiedliche Sharing Konzepte in den vergangenen Jahren herausgebildet, vor allem dank der stark verbreiteten Vernetzung durch mobiles Internet.

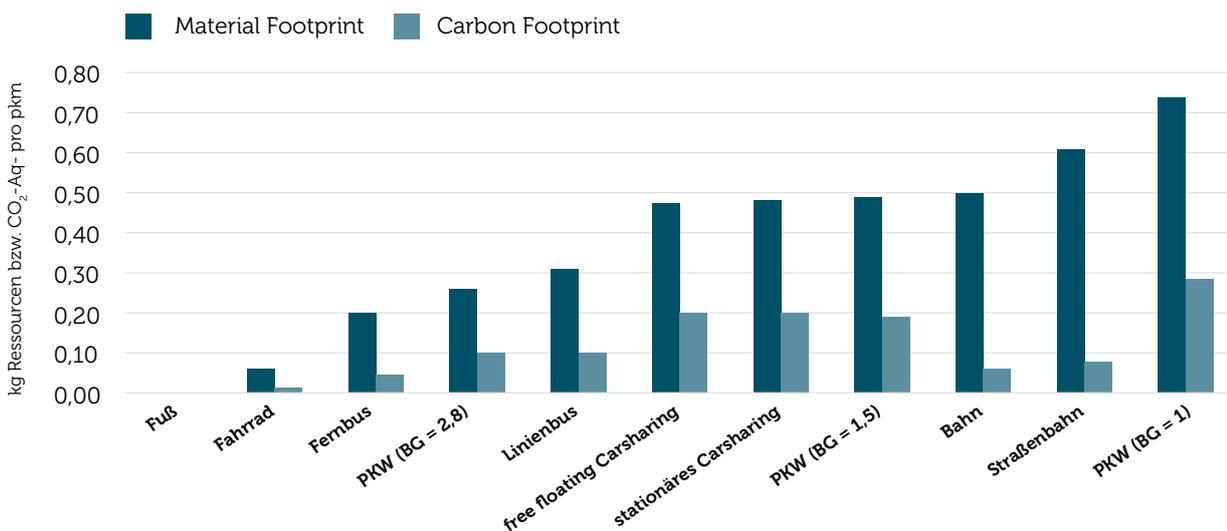
Beim sogenannten stationären Carsharing werden die Autos an festen Stellen angeboten und müssen nach Ende der Nutzung an derselben Stelle wieder abgestellt werden. Beim free floating Carsharing hingegen sind die Autos nur an ein Gebiet (zum Beispiel eine Stadt) gebunden und können nach der Nutzung auf jedem frei zugänglichen Parkplatz abgestellt werden. Im Onlineportal werden die Positionen automatisch angezeigt, damit nachfolgende Nutzende Autos in ihrer Nähe lokalisieren

können. Die Autos besitzen einen von außen erreichbaren Scanner, welcher Mitgliedskarten erkennt und sich darüber öffnen und starten lässt. Beide Formen werden in der Regel von privaten Unternehmen betrieben, die sowohl für den Fuhrpark als auch für die Vermittlung der Autos verantwortlich sind.

Chancen/Risiken aus CE-Perspektive

Basierend auf den Material- und Treibhausgasintensitäten verschiedener Verkehrsmittel zeigt Abbildung 10 eine Übersicht der Potenziale eines Wandels in Richtung zirkulär gedachter Mobilität. Dabei ist zu sehen, dass ein PKW ohne Mitfahrer*in (Besetzungsgrad (BG) = 1) sowohl den höchsten Rohstoffaufwand als auch die meisten Treibhausgasemissionen pro Personenkilometer verursacht. Auch der durchschnittlich besetzte PKW (BG = 1,5) und die beiden Carsharing Angebote mit demselben BG weisen ein deutlich höheres Treibhauspotenzial auf als andere Alternativen des „Nutzens statt Besitzens“. Betrachtet man den Rohstoffaufwand, ergeben sich besonders hohe Werte für die Straßenbahn und den Zug, aber auch den PKW inklusive Carsharing. Ressourcenleicht hingegen sind der Linienbus, ein stark besetzter PKW (Carpooling-durchschnitt: BG = 2,8), der Fernbus und das Fahrrad. Den zu Fuß zurück gelegten Wegen wird kein ökologischer Rucksack zugerechnet.

Abbildung 10: Material- und Treibhausgasintensitäten für vereinzelte Verkehrsmittel (BG = Besetzungsgrad)



Quelle: Bienge & Suski 2017, S. 9

⁶⁹ Vgl. BMUV 2023.

Status quo und Trend

In Studien mehren sich die Beschreibungen veränderter Lebensstile, insbesondere bezüglich der individuellen Mobilität, das ist auch im öffentlichen Leben zu beobachten. Hinsichtlich der Autoflotte und der durchschnittlichen Personenkilometer lässt sich jedoch noch keine Änderung feststellen. Carsharing ist eine der bekanntesten Angebotsformen der Sharing Economy und in den vergangenen Jahren stark gewachsen, insgesamt wurden 2022 rund 2,6 Millionen angemeldete Fahrberechtigte gemeldet.⁷⁰ Dennoch ist es noch ein Nischenmarktsegment, das weniger als ein Prozent der gesamten Personenkilometer in Deutschland abdeckt.

Mit Blick auf die oben dargestellten Potenziale stellt sich also die Frage, welchen Einfluss zum Beispiel das Carsharing realistisch gesehen in Zukunft auf die Ressourcenverbräuche haben wird. In einer vom BMBF finanzierten Studie unter Beteiligung unter anderem des Wuppertal Instituts wurde dabei zwischen zwei Szenarien unterschieden.⁷¹ Szenario A ging von einer starken politischen Unterstützung für Carsharing aus. Dabei würde unter anderem die Bereitstellung von Parkplätzen für Carsharing-Autos und die gute Anbindung zu Angeboten des Öffentlichen Verkehrs (ÖV) gefördert.

Szenario B ging von konstanten Randbedingungen aus, mit entsprechend geringerer Verbreitung von Carsharing. Der Vergleich der beiden Szenarien zeigt, dass nur im Szenario A – also unter deutlich veränderten Rahmenbedingungen – tatsächlich signifikante Veränderungen zu erwarten wären: Hier sinkt der Material-Footprint der betrachteten Gesamtmobilität in Deutschland um ein Prozent und der Carbon-Footprint um 3,6 Prozent.

Effekte auf die Wertschöpfungskette (räumlich, Arbeitsplatzeffekte)

Die Bewertung der Effekte einer so umfassenden Veränderung der Geschäftsmodelle rund um das Produkt Automobil wird massive Effekte auf die Wertschöpfungskette haben, gleichzeitig erhöhen sich damit die Unsicherheiten der Bewertung. Es ist auch zu berücksichtigen, dass sich das Ressourceneffizienzpotenzial von Carsharing derzeit nur unter der Annahme einer gezielten Carsharing-Förderung zeigt, das heißt, nur unter der Annahme, dass eine Nutzung von Carsharing-Angeboten mit einer erhöhten Nutzung des öffentlichen Verkehrs (ÖV) einhergeht, was speziell im ländlichen Raum nicht automatisch möglich sein muss.

Ein Wechsel vom Besitz eines Fahrzeugs zur reinen Nutzung könnte – angesichts der aktuellen täglichen Nutzungsdauer privater PKW von deutlich unter einer Stunde – zu einem erheblichen Rückgang der Nachfrage nach Neu- beziehungsweise Gebrauchtwagen führen. Gleichzeitig ergäben sich damit erhebliche Anreize für ein langlebigeres Produktdesign beziehungsweise für den Kauf möglichst hochwertiger Fahrzeuge – hier wären die deutschen Hersteller wiederum sehr gut aufgestellt. Neue Arbeitsplätze würden sicherlich im Bereich der Plattformökonomie entstehen, bei der digital gestützten Vermittlung von Angebot und Nachfrage im Bereich der Mobilitätsdienstleistungen. Allerdings muss berücksichtigt werden, dass diese Arbeitsplätze im Prinzip an beliebigen Standorten weltweit geschaffen werden können; nicht zwangsläufig in Deutschland.

Ein weiterer Aspekt der Wirkungen auf die Wertschöpfung zeigt sich bei der Betrachtung der direkten und indirekten Reboundeffekte durch die verringerten Kosten des Carpoolings/Carsharings pro Person, die dann für anderen Konsum frei werden. Das heißt, die Kostenersparnis kann sich nicht nur in Mehrausgaben für erhöhte Mobilität niederschlagen, sondern auch in Mehrausgaben für andere Konsumfelder. Eine Beispielrechnung im Rahmen des Projekts „Nutzen statt Besitzen“ für das Carpooling in Unternehmen zeigt dies: Im hier beschriebenen Szenario werden 22,4 Milliarden Fahrzeugkilometer pro Jahr eingespart. Bei angenommenen Kosten von etwa 45 Cent/km führt das Szenario des vermehrten Carpoolings im Berufsverkehr zu Einsparungen von etwa 10,1 Milliarden Euro. Laut den Autor*innen verursacht ein Euro im durchschnittlichen Konsum 0,912 Kilogramm CO₂-Äquivalente. Insgesamt ergäbe sich danach ein Rebound von 9,2 Milliarden CO₂-Äquivalenten.⁷² Dadurch würde der Carbon-Footprint im Vergleich zum Basisszenario nicht sinken, sondern um 1,5 Prozent steigen. Diese Rebound-Rechnung ist stark vereinfacht und dient nicht genauer Potenzialabschätzungen, sondern der Absteckung von Größenordnungen. Die möglichen indirekten Reboundeffekte müssten mit tieferen Analysen betrachtet werden, um entsprechend darauf reagieren zu können.

2.5.2 Intermodale Mobilität

Technische Beschreibung und Wirkungsmechanismus

Ein noch weitergehendes Konzept ist die sogenannte „intermodale Mobilität“. Diese beschreibt ein Mobilitätsverhalten, bei dem verschiedene Verkehrsträger innerhalb eines Weges einfacher miteinander kombiniert werden können. Die Kombinierbarkeit wird durch die Erreichbar-

⁷⁰ Bundesverband CarSharing 2022.

⁷¹ Vgl. Bienge & Suski 2017.

⁷² Gsell et al. 2015.

keit (zum Beispiel Fahrradverleih direkt am Bahnhof) und durch einheitliche Bezahl- und Buchungssysteme erreicht. Dabei ist das Carsharing ein Baustein, um die Mobilität vom ausschließlichen Gebrauch des privaten PKW hin zur situationsabhängigen Wahl des Verkehrsmittels zu verändern. Infolgedessen steigt der Anteil des öffentlichen Verkehrs und des Fahrrads. Wichtige Grundvoraussetzung ist eine sehr leichte und weit verbreitete Nutzbarkeit von Alternativen zum PKW. So wäre es denkbar, mit einem Account oder einem Monatsabonnement und mit einer einzigen Mobilitätskarte oder Smartphone App Bus und Bahn zu fahren sowie Car- und Bikesharing zu nutzen. Karten und Suchfunktionen für Verbindungen ermitteln automatisch die passenden Kombinationen und bieten Alternativen an. Standorte von Mietfahrrädern und -autos werden dabei dynamisch erfasst und einbezogen.

Chancen/Risiken aus CE-Perspektive

Der Material-Footprint für die Mobilität in Deutschland sinkt in der Modellierung auch hier um ein Prozent, was einer reduzierten Ressourceninanspruchnahme von etwa fünf Milliarden Kilogramm Rohstoffen entspricht. Durch eine starke Nutzung von Leihrädern auf Kurzstrecken anstelle von Carsharing kann das Potenzial auf 1,6 Prozent (8,5 Milliarden Kilogramm) erhöht werden. Der Carbon-Footprint sinkt um etwa 3,6 Prozent, was Einsparungen von Treibhausgasemissionen von 6,6 Milliarden Kilogramm CO₂-Äquivalenten) entspricht. Durch eine starke Nutzung von Fahrrädern auf Kurzstrecken statt Carsharing kann das Potenzial auf 4,5 Prozent (8,1 Milliarden Kilogramm CO₂-Äquivalente) erhöht werden.

Status quo und Trend

Die intermodale Mobilität ist als Konzept schon seit Jahren hoch auf der politischen Agenda, in der konkreten Umsetzung jedoch noch nicht wirklich vorangeschritten. Die Analyse zeigt aber, dass Carsharing nicht losgelöst von anderen Verkehrsmitteln gesehen werden kann, denn um Aussagen zur ökologischen Wirkung treffen zu können, ist eine Betrachtung des gesamten Mobilitätsverhaltens notwendig, die auch Verschiebungen zwischen dem motorisierten Individualverkehr und dem öffentlichen Nah- und Fernverkehr integriert.

Effekte auf die Wertschöpfungskette (räumlich, Arbeitsplatzeffekte)

Analog zum Carsharing zeigt sich also auch hier, dass der Einbezug von Nutzungs- beziehungsweise vor allem Förderkonzepten sowohl Chancen als auch Risiken der zirkulären Transformation deutlich erhöht. Die konkreten Effekte werden dabei zentral von der Gestaltung einzelner Parameter abhängen, zum Beispiel der Veränderungen des Modal Splits. Hier ist die Kreislaufwirtschaft eindeutig ein Thema, das in den bestehenden Modellierungen bisher kaum berücksichtigt wird, das aber zentrale Effekte auf die letztendliche Ausgestaltung der Wertschöpfungskette haben könnte.

3

3. Analyse regulatorischer Rahmen der Kreislaufwirtschaft für den Automobilsektor

Angesichts der in Kapitel 2 dargestellten vielfältigen Ansätze, die Zirkularität im Automobilsektor zu erhöhen und damit zusätzliche Wertschöpfung und Arbeitsplätze zu generieren, stellt sich die Frage, wieso solche Konzepte nicht längst flächendeckend umgesetzt sind, sondern häufig noch auf dem Level von Machbarkeitsstudien und Pilotkonzepten verbleiben.

Vor diesem Hintergrund sollen im Folgenden der regulatorische Rahmen der Kreislaufwirtschaft kurz umrissen (Kap. 3.1) und die zentralen regulatorischen Hemmnisse beschrieben werden (Kap. 3.2). Im Kapitel 3.3 werden dann verschiedene Ansätze diskutiert, diese regulatorischen Hemmnisse anzugehen und somit die Voraussetzungen für die Umsetzung der oben dargestellten Ansätze zu verbessern.

3.1 Regulatorischer Rahmen zur Kreislaufwirtschaft im Automobilsektor

Die folgenden Ausführungen beanspruchen nicht, einen vollständigen Überblick über die unterschiedlichen Regulierungsstrukturen der Kreislaufwirtschaft im Automobilsektor zu geben. Allein die abfallrechtlichen Fragestellungen zur Behandlung einzelner Abfallströme sind dermaßen komplex, dass sie im Grunde nur von spezialisierten Fachjuristen vollständig durchdrungen werden. Hinzu kommen noch handelsrechtliche Fragestellungen, Fragestellungen der Produktsicherheit beim Einsatz von Rezyklaten, bilanzierungstechnische Fragestellungen bei der Gestaltung zirkulärer Geschäftsmodelle und mehr. Kreislaufwirtschaft als Querschnittsansatz ist immer auch mit der Herausforderung verbunden, das Denken in Kreisläufen in unterschiedlichsten Rechtsmaterien zu verankern beziehungsweise zu ermöglichen.

Die wichtigsten regulatorischen Impulse wurden dabei in den vergangenen Jahren auf der europäischen Ebene gesetzt. Für die Kreislaufführung von Materialien aus dem Automobilsektor ist die Richtlinie 2000/53/EG des europäischen Parlaments und des Rates vom 18. September 2000 über Altfahrzeuge relevant.⁷³ Diese Richtlinie legt seit 2015 für Altfahrzeuge eine Wiederverwendungs-/Recyc-

lingquote von 85 Prozent und eine Wiederverwendungs-/Verwertungsquote von 95 Prozent fest. Dabei sind Altfahrzeuge definiert als Pkw sowie Lkw, deren Nutzungsphase beendet ist.⁷⁴ Darüber hinaus legt die Richtlinie fest, dass von den Fahrzeugherstellern eine flächendeckende Infrastruktur zur Rücknahme von Altfahrzeugen sichergestellt werden muss. Die Rückgabe von Altfahrzeugen der Letzt-eigentümer*innen an die Hersteller ist für diese kostenfrei, da die Hersteller die Entsorgungskosten übernehmen müssen.⁷⁵ Ähnlich wie für Verpackungen oder Elektroaltgeräte gilt das Prinzip der sogenannten erweiterten Herstellerverantwortung: Die Inverkehrbringer müssen auch die physische und finanzielle Verantwortung für die Nutzungsphase übernehmen. In der Regel haben die Hersteller dazu Verträge mit Entsorgern abgeschlossen, die diese Aufgabe für sie übernehmen.

Über abfallrechtliche Anforderungen hinaus gibt es noch spezifische Regelungen, die sich auf die Zirkularität des Sektors auswirken. Im Bereich des Klimaschutzes ist insbesondere die geltende Verordnung (EU) 2019/631 – Verordnung zur Festsetzung von CO₂-Emissionsnormen für neue Personenkraftwagen und für neue leichte Nutzfahrzeuge und zur Aufhebung der Verordnungen (EG) Nr. 443/2009 und (EU) Nr. 510/2011 – von besonderer Relevanz. Sie legt die sogenannten CO₂-Flottengrenzwerte (in g CO₂/km) für Pkw und leichte Nutzfahrzeuge fest. Der Flottengrenzwert ist so definiert, dass im Durchschnitt alle in der EU in einem Jahr zugelassenen Fahrzeuge diesen Wert nicht überschreiten dürfen. Klimabilanzen der Hersteller, zum Beispiel nach dem GHG-Protokoll, sind dabei auch ein zentraler Treiber für den Einsatz von recycelten Rohstoffen, da diese mit deutlich niedrigeren CO₂-Emissionen in die Bilanz eingehen. Die CO₂-Flottengrenzwerte beziehen sich dagegen nur auf den Verbrauch der Fahrzeuge und haben damit wichtige Impulse für den Einsatz von Leichtbaumaterialien gesetzt; die Frage der Kreislauffähigkeit dieser Materialien beziehungsweise der Materialkombinationen spielte dabei jedoch kaum eine Rolle.

Ein für die Zukunft zentraler Treiber der Zirkularität von Produkten wird die 2022 von der Kommission als Ent-

⁷³ BMU o. J.

⁷⁴ Wilts 2018.

⁷⁵ BMU o. J.

wurfsfassung vorgelegte „Ecodesign for Sustainable Products Regulation“⁷⁶ (ESPR) sein, die sehr grundlegend auf das zirkuläre Design von Produkten abzielt, die in der EU in Verkehr gebracht werden. Der Entwurf der Regulierung ist eine signifikante Erweiterung der bestehenden Ecodesign-Richtlinie, die auf energierelevante Produkte fokussiert war. Auf der Basis von Hintergrundstudien und Arbeitsgruppen sollen jetzt auch weitergehende Anforderungen an Produkte gestellt werden können, damit diese in Zukunft auf dem europäischen Markt in Verkehr gebracht werden dürfen. Hierzu gehören unter anderem nach § 1 die Haltbarkeit von Produkten, ihre Reparierbarkeit oder der Anteil recycelter Materialien. Analog zur bestehenden Ecodesign-Regulierung ergibt sich damit ein weitreichender Anwendungsbereich, der dazu beitragen könnte, die Zirkularität von Produkten zu stärken. Im Rahmen der Verhandlungen zur Umsetzung der ESPR wurde der Fokus insbesondere auf die Bereitstellung von transparenten Informationen zu Produkten gelegt, beispielsweise für den Nachweis von Rezyklatanteilen – genau hier setzen die in Artikel 8 angelegten digitalen Produktpässe an. Fahrzeuge sind bislang noch nicht als prioritäre Produktgruppen für die Entwicklung entsprechender Vorgaben genannt, sie könnten im nächsten Schritt ergänzt werden.

3.2 Identifikation der zentralen regulatorischen Hemmnisse

Mit Blick auf die häufig noch linear geprägte Praxis des Automobilsektors lässt sich aus dem Geflecht der regulatorischen Vorgaben eine ganze Reihe verschiedener Hemmnisse ableiten, die den Transformationsprozess zur Kreislaufwirtschaft erschweren beziehungsweise verlangsamen. Einige zentrale Punkte sollen im Folgenden in ihren Wirkungsmechanismen und Anreizstrukturen beschrieben werden.

Fehlende Vorgaben für ein Design for Recycling

Eine der zentralen Hürden für das hochwertige Recycling von Fahrzeugen am Ende ihrer Nutzungsphase ist die Art und Weise, in der diese designt und produziert werden. Sowohl das Design als auch der eigentliche Produktionsprozess sind in vielerlei Hinsicht sehr detailliert geregelt, zum Beispiel mit Blick auf die Verwertung der im Produktionsprozess anfallenden Abfälle und hinsichtlich von Sicherheitsaspekten für die Insassen. Solche Ansätze werden im Rahmen der laufenden Überarbeitung der Altfahrzeugrichtlinie zwar diskutiert, bislang gibt es jedoch kaum verbindliche Vorgaben, die die Recyclingfähigkeit des finalen Produkts betreffen. In der Vergangenheit wurden im Sinne einer qualitativen Abfallvermeidung verschiedene Stoffe verboten, die in der Nachnutzungsphase

für Mensch und Umwelt gefährlich werden könnten (beispielsweise FCKW oder Chrom VI). Es gibt aber zum Beispiel keinerlei Vorgaben dafür, Stoffe nicht einzusetzen, für die noch überhaupt keine geeigneten Recyclingverfahren existieren. Unter anderem die Circular Car Initiative arbeitet an „Circular Design Guides“, die bislang jedoch völlig freiwillig und unverbindlich sind.

Der Grund für fehlende Vorgaben sind zum einen Konflikte zwischen verschiedenen umweltpolitischen Zielen: Überspitzt formuliert wäre aus Sicht der Recyclingfähigkeit ein Fahrzeugdesign ideal, das komplett aus Stahl bestünde. Damit verbunden wäre allerdings ein extrem hohes Fahrzeuggewicht, das zu einem äußerst hohen Spritverbrauch und damit CO₂-Emissionen führen würde. Da die meisten CO₂-Emissionen während der Nutzungsphase eines Fahrzeugs anfallen, würde sich die erhöhte Recyclingfähigkeit und die damit möglichen CO₂-Einsparungen durch höhere Recyclingquoten nicht rechtfertigen lassen.

Gleichzeitig gibt es zum anderen in vielen Bereichen ein noch nicht erschlossenes Optimierungspotenzial, das sich weder auf die entstehenden CO₂-Emissionen noch auf die Qualität des Fahrzeugs negativ auswirken müsste. Ein konkretes Beispiel (vgl. Kapitel 2.1.2) sind Kunststoffverkleidungen im Innenraum, die häufig aus gerußten schwarzen Kunststoffen bestehen, damit die entstehenden Ölverschmierungen nicht direkt sichtbar werden. Diese Kunststoffe lassen sich in der Sortierung nur sehr schwer erfassen und gehen damit in der Regel in die thermische Verwertung; hier handelt es sich allein um einen ästhetischen Aspekt, der zu minimalen Mehrkosten anders gelöst werden könnte.

Analog fehlt es auch bei Stahllegierungen bislang weitestgehend an Vorgaben, welche Kombinationen von Zuschlagstoffen und Beimischungen am Ende ein sinnvolles Recycling ermöglichen würden. Im Endeffekt werden einzelne Komponenten durch den Schredderprozess zu Störstoffen, die ein noch hochwertigeres Recycling verhindern.

Auch bei den eingesetzten Elektronikkomponenten fehlt es häufig an Vorgaben zu Gestaltung, Lokalisierung oder Art und Weise des Verbaus, die ein rentables Recycling ermöglichen würden. Hier sind beispielsweise häufig verklebte Teile zu finden, die kaum noch eine zerstörungsfreie Demontage ermöglichen, die jedoch nötig wäre, um zum Beispiel Leiterplatten separat entnehmen zu können.

In Summe ist es aber auch die Vielzahl der Gestaltungsformen, die zum Beispiel immer wieder die Umstellung

⁷⁶ Vgl. Europäische Kommission 2022b.

von Demontageprozessen erfordern würden; damit werden die ohnehin sehr schmalen Margen sehr schnell durch erhöhten Zeitaufwand und damit Personalkosten aufgebraucht. Das Potenzial zur Verringerung des Aufwandes der Separation bei der manuellen Demontage wird in Expertenkreisen als gering eingeschätzt. Eine Mechanisierung oder gar Automatisierung und einheitliche Prozessabläufe für die Separation sind unwahrscheinlich, denn ohne klare Standards und Normen erfordern ständige Wechsel von Fahrzeugmodellen oder -typen permanente Anpassungen im Recyclingprozess.⁷⁷

3.2.1 Intransparenz der eingesetzten Rohstoffe

Eng verknüpft mit der Frage des Produktdesigns ist die Intransparenz der eingesetzten Rohstoffe, die dann für die Altfahrzeuge und einzelne Komponenten zu hohen Unsicherheiten über den tatsächlichen Wert führen, der sich durch ein hochwertiges Recycling erzielen ließe.

In der wirtschaftswissenschaftlichen Theorie wurde dieses Phänomen vom späteren Nobelpreisträger Akerlof schon 1969 am Beispiel von Gebrauchtwagen beschrieben.⁷⁸ Wenn sich der tatsächliche Wert eines Produkts beziehungsweise eines konkreten Abfalls nur mit hohem Aufwand feststellen lässt, bestehen hohe Anreize für die Anbieter, die wahre Qualität des Produkts zu verschleiern – was zu einem grundsätzlichen Misstrauen auf der Abnehmerseite führt. Im Endeffekt werden dann weniger Abfälle einem hochwertigen Recycling zugeführt als aus volkswirtschaftlicher Sicht grundsätzlich sinnvoll wäre – damit bleiben Wertschöpfung und Beschäftigung unterhalb des eigentlich erreichbaren Niveaus.

Ganz konkret zeigt sich dieses Hemmnis beim Recycling der Katalysatoren: Bei der Reinigung der Abgase gehen kontinuierlich geringe Anteile der enthaltenen Platingruppenmetalle (PGM) verloren; die Menge ist unter anderem stark abhängig von der Art der Nutzung und dem Oktanwert des verwendeten Kraftstoffs. Hinzu kommen kriminelle Aktivitäten: Der Kat wird geöffnet, das Palladium und Platin entnommen und der Rest einem Recycler zum Kauf angeboten. Da sich der tatsächliche PGM-Gehalt nicht ohne größeren Aufwand feststellen lässt, wird der Aufkäufer also einen gewissen Risikoabschlag vornehmen müssen – damit sinken die Anreize für eine tatsächlich umfassende Sammlung.

Ähnliches gilt für eigentlich alle Komponenten eines Fahrzeugs, zum Beispiel für die Elektronikkomponenten: „Die

Datenbasis zum Gehalt strategischer und kritischer Metalle in Fahrzeugmodellen und -bestandteilen ist nicht ausreichend, besonders wenn sich die Ausrüstung mit elektronischen Komponenten und ihrem Metallgehalt von einer Fahrzeuggeneration zur folgenden Generation dauerhaft ändert.“⁷⁹ Ohne exakte Kenntnis darüber, welche Rohstoffe in den Komponenten enthalten sind, können Recycler nicht genau einschätzen, welche Verfahren oder welcher Aufbereitungsaufwand hier optimalerweise zu wählen wäre – damit steigen die Anreize für ein Downcycling, das nur die gesetzlichen Vorgaben erfüllt.

Wie dargestellt, will die Europäische Kommission speziell an diesem Hemmnis ansetzen, unter anderem mit der in der ESPR angelegten Verpflichtung zur Entwicklung digitaler Produktpässe, wo die Daten zu Rohstoffgehalten hinterlegt werden sollen. Für Batterien wird eine entsprechende Pflicht ab 2026 gelten, für andere Produktgruppen laufen intensive Vorbereitungsprozesse.

3.2.2 Input-basierte Recyclingquoten setzen begrenzte Anreize für hochwertiges Recycling

Betrachtet man die gesetzlichen Vorgaben für das Recycling, so sind hier zunächst sehr hoch gesetzte Recyclingquoten zu erfüllen (vgl. Kap. 3.1), die den Eindruck fast geschlossener Stoffkreisläufe vermitteln.

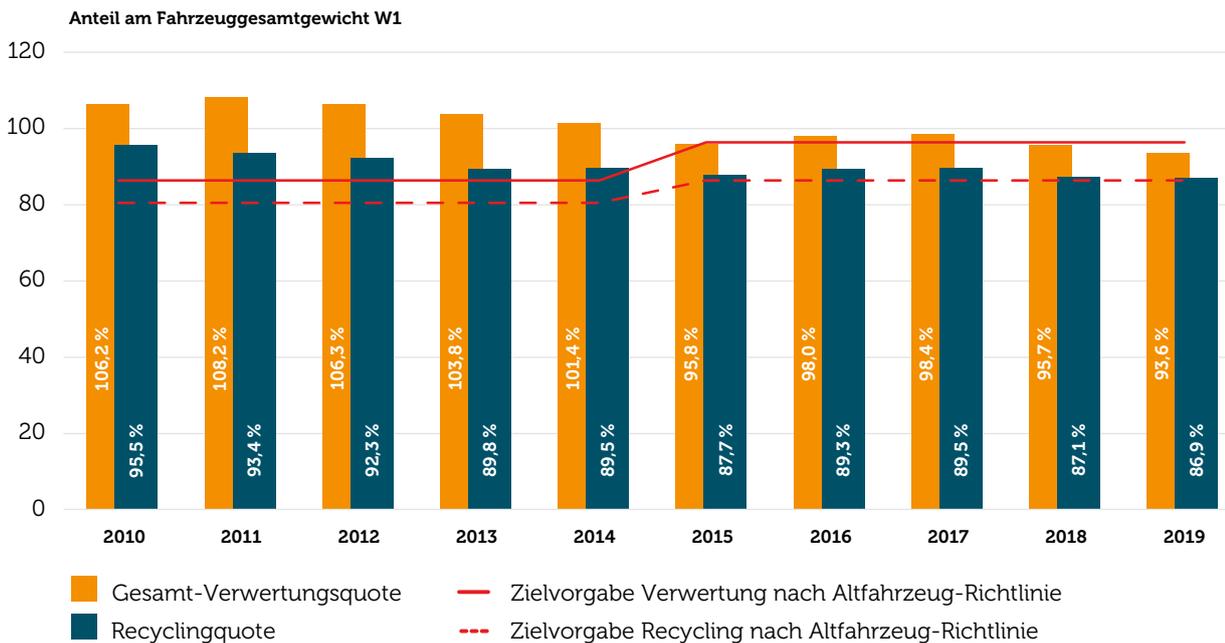
Hierbei ist jedoch zu berücksichtigen, dass es sich um sogenannte inputbasierte Recyclingquoten handelt: Demnach gilt ein Abfall als vollständig recycelt, sobald er in einer Recyclinganlage behandelt wird – unabhängig davon, welche Verluste bei diesem Prozess auftreten. Davon zu unterscheiden sind outputbasierte Quoten, die nur das erfassen, was am Ende tatsächlich zurückgewonnen wird. So ergibt sich zum Beispiel bei Kunststoff-Fraktionen regelmäßig ein Anteil von etwa 20–30 Prozent, der im Prozess der Aufbereitung aufgrund von Verschmutzungen oder Anhaftungen, wegen der Größe oder weil er nicht eindeutig erkannt werden konnte, aussortiert und dann in der Regel thermisch verwertet wird. Der Logik der Quote nach gelten diese Stoffe jedoch als recycelt. Die folgende Abbildung verdeutlicht die schwierige Interpretation dieser Verwertungs- beziehungsweise Recyclingquoten; demnach wurden in den Jahren 2010 bis 2014 Verwertungsquoten von über 100 Prozent erzielt – was auf das zeitverzögerte Recycling der Fahrzeuge zurückzuführen ist, die massenhaft im Rahmen der Gewährung einer „Abwrackprämie“ im Jahr 2009 angefallen sind.

⁷⁷ Groke et al. 2017.

⁷⁸ Akerlof 1969.

⁷⁹ Groke et al. 2017.

Abbildung 11: Altfahrzeug-Verwertungsquoten Deutschland 2010 bis 2019



Anmerkung: Verwertungsquoten über 100 % in den Jahren 2010 bis 2014 sind eine Folgewirkung der zeitlich versetzten Verwertung von Altfahrzeugen aus der Phase der Umweltprämie.

Quelle: Statistisches Bundesamt, Erhebung über die Abfallentsorgung der Jahre 2010 bis 2019, Mitteilung an das Umweltbundesamt; Umweltbundesamt, eigene Berechnung

Quelle: UBA 2023a

Noch klarere Abweichungen ergeben sich, wenn man die tatsächliche Rückgewinnung einzelner Metalle zum Beispiel aus den Elektronikkomponenten betrachtet: Hier kann etwa eine Leiterplatte zu 100 Prozent als recycelt gelten, selbst wenn null Prozent des darauf enthaltenen Golds, Tantals oder Palladiums zurückgewonnen wurden. Das entspricht der gängigen Praxis, wenn diese Metalle nicht separat entnommen werden; gerade viele der kritischen Rohstoffe gehen im Schredderprozess dissipativ verloren.⁸⁰

Die Berechnung der Recyclingquoten ist von der Europäischen Kommission vorgegeben, um auch eine Vergleichbarkeit zwischen den Angaben der einzelnen EU-Mitgliedsstaaten zu gewährleisten. Die Quoten sind auch insofern sinnvoll, weil die Inputs deutlich einfacher zu erfassen sind als die komplexen Outputströme der einzelnen Behandlungsschritte. Insgesamt setzen sie jedoch Anreize, eher den Durchsatz zu erhöhen als die Qualität des Recyclingprozesses. Insbesondere für die in kleinen Mengen verwendeten kritischen Rohstoffe ergeben sich daraus kaum Impulse für eine Rückgewinnung – dies passiert nur, wenn die Rohstoffpreise den Aufwand rechtfertigen, ansonsten eben nicht.

3.2.3 Fehlende Qualitätsstandards speziell für Kunststoffzyklate

Betrachtet man das Ende der Recyclingprozesse, ergeben sich erhebliche Unsicherheiten, ab wann ein Stoff nicht mehr als Abfall, sondern wieder als vollwertiger Rohstoff betrachtet werden sollte – und damit das Abfallregime mit seinen verschiedenen Vorschriften, zum Beispiel zur Lagerung oder Verbringung, verlässt. Solche „end of waste“-Kriterien werden auf europäischer Ebene intensiv diskutiert – aktuell führen sie dazu, dass Hersteller im Zweifelsfall lieber auf Primärrohstoffe setzen.

Vor allem bei Kunststoffen kommt hinzu, dass es bislang an standardisierten und normierten Qualitätskriterien fehlt, die Grundlage für Vertragsverhandlungen zwischen Recyclern und kunststoffverarbeitender Industrie sein könnten. Für Primärkunststoffe gibt es seit Jahrzehnten sehr klar ausdifferenzierte Qualitätsparameter, die beispielsweise bei Preisverhandlungen zugrunde gelegt werden. Beim Einsatz von Sekundärkunststoffen führt das Fehlen solcher Standards zu aufwändigen Abstimmungsprozessen, die im Endeffekt den Preis des Einsatzes von Rezyklaten weiter erhöhen und damit schnell unrentabel werden lassen.

⁸⁰ Sander et al. 2017.

Speziell in öffentlichen Ausschreibungen werden mangels Alternativen häufig auch Qualitätskriterien benannt, die speziell auf Primärkunststoffe ausgelegt sind, zum Beispiel mit Blick auf Spannbreiten für technische Parameter wie die Viskosität des Materials. Hier haben Sekundärrohstoffe aufgrund des heterogenen Ausgangsmaterials größere Schwankungen, ohne dass diese für die konkrete Anwendung von Relevanz sein müssen – der fehlende Standard führt dann aber dazu, dass hier letztendlich doch neues Material eingesetzt wird. Im Automobilbereich sind speziell für sicherheitsrelevante Teile häufig extrem genau definierte Kriterien notwendig, die teilweise tatsächlich nicht durch Sekundärrohstoffe erreicht werden können – in vielen anderen Bereichen wäre das aber grundsätzlich vorstellbar.

Im Rahmen der vom DIN koordinierten „Normungsroadmap Circular Economy“⁸¹ wurden unter Beteiligung von über 1.000 Industrieakteuren konkrete Normungsbedarfe identifiziert, wo fehlende oder veraltete Normen die Transformation zur Circular Economy behindern. Hier wurden insbesondere die dargestellten Schwierigkeiten im Umgang mit Kunststoffzyklen hervorgehoben. Die Ergebnisse wurden dem BMU übergeben, hieraus sollen jetzt konkrete Normungsmandate entweder an nationale oder europäische Normungsgremien abgeleitet werden.

3.2.4 Herstellerverantwortung bezieht sich nur auf in der EU verbleibende Fahrzeuge

Das vermutlich wichtigste Hemmnis für die Etablierung zirkulärer Geschäftsmodelle im Automobilbereich ist die aktuelle Ausgestaltung der erweiterten Herstellerverantwortung: Laut Gesetz sind die Inverkehrbringer von Fahrzeugen sowohl physisch als auch finanziell für die Nachnutzungsphase der Fahrzeuge verantwortlich, also sowohl für die Sammlung als auch für das Recycling. Theoretisch sollen damit Anreize gesetzt werden, zum

Beispiel die Recyclingfähigkeit bereits im Produktdesign zu berücksichtigen, wenn sich damit die Kosten beziehungsweise Erlösstrukturen im Recycling verbessern lassen.

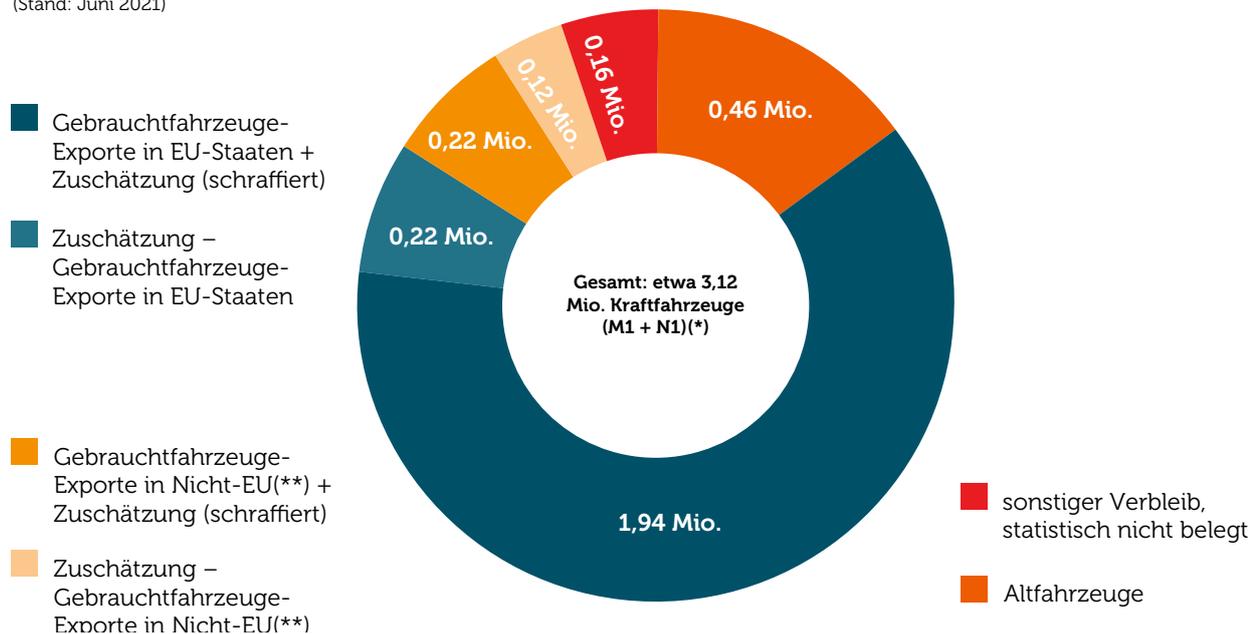
In der Praxis wird jedoch nur ein sehr geringer Anteil der in Deutschland abgemeldeten Fahrzeuge tatsächlich hier einem Recycling zugeführt. Abbildung 11 zeigt, dass im Jahr 2019 von den 3,1 Millionen abgemeldeten Kraftfahrzeugen (PKW und LKW) nur 460.000 tatsächlich in Deutschland verwertet wurden – dementsprechend wenig aussagekräftig sind auch die hier erzielten Recyclingquoten.

Der überwiegende Teil der Fahrzeuge wird zunächst ins EU-Ausland verbracht, vor allem in die östlichen Mitgliedsstaaten. Dort werden die Fahrzeuge noch einige Jahre weiter genutzt, bis sie den dort geltenden Umweltvorgaben beziehungsweise Ansprüchen der Nutzer*innen nicht mehr entsprechen. Sehr häufig haben die Fahrzeuge dann noch eine dritte Nutzungsphase außerhalb der EU, zum Beispiel werden sie über den Landweg in Länder wie Kasachstan verbracht oder per Schiff nach Westafrika, zum Beispiel nach Ghana. Im Sinne der Abfallvermeidung ist es natürlich sinnvoll, Produkte so lange wie möglich zu nutzen; bei PKW ergeben sich aber häufig steigende Umweltbelastungen über die Nutzungsdauer, zum Beispiel, wenn der Kat irgendwann nicht mehr ausreichend funktionsfähig ist. Hinzu kommt, dass am Ende der Nutzungsphase, zum Beispiel in Ghana, selbstverständlich nicht mehr die Vorgaben der deutschen Altfahrzeugverordnung gelten – dort werden die rentablen Rohstoffe entnommen, Schadstoffe wie Betriebsflüssigkeiten oder das Blei aus den Batterien werden aber ohne weitere Vorkehrungen in die Umwelt entsorgt; mit teilweise katastrophalen Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit und die Umwelt.

⁸¹ Deutsches Institut für Normung (DIN) 2019.

Abbildung 12: Verbleib der endgültig stillgelegten Fahrzeuge in Deutschland 2019

(Stand: Juni 2021)



Quelle: UBA 2021

Die eigentliche Verantwortung der Hersteller endet an der EU-Außengrenze: Mit dem Export als Gebrauchtfahrzeug wird das Fahrzeug zu einem frei handelbaren Wirtschaftsgut; für das Recycling sind dann je nach Rechtslage andere Akteure in den Zielländern zuständig.

Angesichts der Tatsache, dass deutlich weniger als 20 Prozent der Fahrzeuge tatsächlich in Deutschland recycelt werden, rechnen sich Investitionen in die Recyclingfähigkeit der Fahrzeuge nur sehr begrenzt – zu über 80 Prozent profitieren davon dann andere Akteure irgendwo auf dem Globus. Insbesondere bei den steigenden Anteilen batteriebetriebener Fahrzeuge ist klar, dass hier akuter Handlungsbedarf besteht – die darin enthaltenen kritischen Rohstoffe sind für die Hersteller von so strategischer Bedeutung, dass entweder der Export eingeschränkt oder in den Zielländern entsprechende Sammelstruktur aufgebaut werden müssten.

Aus umweltpolitischer Sicht ergibt sich damit ein Dilemma: Jede Verschärfung der nationalen beziehungsweise auch EU-weiten Vorgaben für das Recycling der Fahrzeuge erhöht die Anreize, die Fahrzeuge stattdessen ins Ausland zu verbringen. Bereits heute ist zu beobachten, dass viele Fahrzeuge nach Polen oder Tschechien gebracht werden, um dann in Recyclinghöfen direkt hinter der Grenze zu deutlich laxer gehandhabten Umweltstandards ausgeschlachtet zu werden.

3.2.5 Abgrenzung Gebrauchtwagen/Altfahrzeug – Struktur der Rücknahme in Deutschland

Häufig wird auch die Forderung nach dem Verbot des Exports solcher Fahrzeuge erhoben, wenn in den Zielländern keine entsprechende Infrastruktur für das Recycling vorhanden ist. Dem gegenüber steht der oben beschriebene Aspekt der Abfallvermeidung: Die Alternative für die Bevölkerung in Ländern wie Kasachstan oder Ghana wäre sicherlich nur sehr eingeschränkt die verstärkte Nutzung des ÖPNVs, stattdessen vermutlich zumindest teilweise der Erwerb von neuen, dann vielleicht minderwertigeren Fahrzeugen.

Aus rechtlicher Perspektive ergibt sich zudem die Herausforderung, an der Grenze festzustellen, ob es sich hier um den legalen Export eines Gebrauchtfahrzeugs handelt oder um den illegalen Export eines nicht mehr gebrauchsfähigen beziehungsweise nicht mehr reparierbaren Altfahrzeugs – erst dann wäre es nämlich Abfall, dessen internationaler Handel deutlich höheren Anforderungen unterliegt. Zudem ist an der Grenze kaum feststellbar, in welches Land solch ein Fahrzeug letztendlich tatsächlich transportiert werden soll. Bereits in den inner-europäischen Statistiken ist auffällig, dass extrem viele Fahrzeuge in die Niederlande exportiert werden – in der Realität sind die Niederlande nur Transitland, von dort werden die Fahrzeuge über den Hafen in Rotterdam in die tatsächlichen Zielländer verbracht. Letzten Endes fehlt es bislang an Möglichkeiten, den tatsächlichen Verbleib eines Fahrzeugs zu überprüfen, um sicherstellen zu können, dass die Kosten eines ordnungsgemäßen Recyclings

dem Hersteller angelastet und die Rohstoffe tatsächlich auch zurückgewonnen werden.

Bei der Rücknahme in Deutschland ergibt sich die spezifische Herausforderung, dass die Hersteller ein „flächendeckendes“ Netz an Rückgabestellen anbieten müssen; kein PKW-Halter, der sein Fahrzeug abgeben will, soll dafür eine Distanz von mehr als 50 Kilometern überbrücken müssen. Daraus ergibt sich jedoch eine sehr kleinteilige Struktur an Demontagebetrieben, die schwer zu überwachen ist. Zusätzlich fehlt es den über 1.000 Demontagebetrieben häufig auch an den finanziellen Ressourcen, ihre Betriebe auf den jeweils optimalen Stand der Technik zu bringen, der beispielsweise eine vertiefte Demontage ermöglichen würde.

3.3. Instrumente zur Unterstützung der Zirkularität in der Wertschöpfungskette Automobil

Die hier dargestellten Hemmnisse sind den allermeisten Akteuren am Markt durchaus bewusst und wurden teilweise bereits in verschiedenen Studien für die Europäische Kommission oder das Bundesumweltministerium beschrieben. Mit dem verstärkten regulatorischen Druck durch die Europäische Kommission und die umfassende Umstrukturierung des Markts durch den Wandel hin zur Elektromobilität ergibt sich jetzt jedoch ein Möglichkeitsfenster, notwendige Investitionen direkt mit Blick auf zirkuläre Geschäftsmodelle zu tätigen.

Hierzu sollen im Folgenden verschiedene, aktuell diskutierte Instrumente dargestellt werden, die zur mittel- und langfristigen Erhöhung der Zirkularität im Automobilssektor beitragen würden. Ihnen allen gemein ist, dass sie auf eine verstärkte Kooperation zwischen verschiedenen Akteuren entlang der Wertschöpfungskette abzielen, ebenso aber auch auf neue Kooperationsformen zwischen Politik und Industrie.

3.3.1 Vorgaben zur Recyclingfähigkeit von Fahrzeugen zum gegebenen Stand der Recyclinginfrastruktur

Zentral wären wie dargestellt Anpassungen des Designs von Fahrzeugen, um eine bessere Demontage und damit auch Recyclingfähigkeit einzelner Komponenten zu ermöglichen. Mit dem vorgelegten Entwurf der ESPR würden hierfür auf europäischer Ebene die notwendigen rechtlichen Grundlagen gelegt, allerdings bislang noch nicht speziell mit Blick auf Fahrzeuge (auch nicht im Anwendungsbereich des geplanten Rechts auf Reparatur). Hier gerät das klassische Umweltrecht klar an seine Grenzen: Es wäre nur schwer vorstellbar, dass der Gesetzgeber detailliert das Design von Fahrzeugen vorschreibt – dazu

fehlt ihm das notwendige Expertenwissen, das hier eindeutig bei den OEMs liegt, und zudem wäre aufgrund der extrem hohen Innovationsdynamik in diesem Bereich ein kontinuierliches Update solcher Vorgaben notwendig. Gerade mit Blick auf Handlungsmöglichkeiten auf der nationalen Ebene wäre es eine Option, über die finanzielle Verantwortung der Hersteller für die Entsorgung einen ökonomischen Anreiz zu setzen, die Recyclingfähigkeit der Fahrzeuge zu erhöhen; konkret über die sogenannte ökologische Differenzierung von Lizenzentgelten („ecomodulation of fees“): Die Hersteller würden einen Abschlag für die Entsorgungskosten von Fahrzeugen bekommen, die besonders einfach zu recyceln sind – umgekehrt müssten sie einen Zuschlag bezahlen, wenn klar ist, dass das Fahrzeug eben genau nicht für ein Recycling ausgelegt ist. Ein solches System wird beispielsweise aktuell intensiv für Herstellerverantwortung bei Verpackungen diskutiert, hier gibt es positive Erfahrungen zum Beispiel aus Frankreich und Italien. Die OECD hat sich intensiv mit der Effektivität und Effizienz solcher Ansätze beschäftigt und kommt dabei zu einer klar positiven Einschätzung, wonach die Gebührenmodulation, das heißt, die Änderung der von den Herstellern in einem kollektiven Herstellerverantwortungssystem gezahlten Gebühren auf der Grundlage des Produktdesigns, den Herstellern stärkere Designanreize bieten kann.⁸² Denkbar wäre zum Beispiel die Einrichtung eines nationalen Fonds, über den solche Zu- und Abschläge verwaltet würden. Notwendig wäre dafür aber die Entwicklung klarer Kriterien, wie die Recyclingfähigkeit konkret bestimmt werden kann (vgl. Kapitel 3.2.4 zu den Ergebnissen der DIN CE Normungsroadmap).

3.3.2 Digitale Produktpässe als Enabler hochwertig geschlossener Stoffkreisläufe

Für verschiedene der oben dargestellten Hemmnisse stellt sich die Frage, wie Informationen aus der Produktions- und Nutzungsphase möglichst effizient bis zu den Recyclern weitergegeben werden können. Ein Ansatz hierzu wären digitale Produktpässe, wie sie zum Beispiel im „European Green Deal“ und dem „Circular Economy Action Plan“ EU genannt werden. In beiden Strategiepapieren der Europäischen Kommission wird ein elektronischer beziehungsweise digitaler Produktpass als wesentliches Instrument für eine klimaschonende und ressourceneffiziente Wirtschaft genannt. Dieser soll unter anderem Informationen über Herkunft, Zusammensetzung, Reparatur- und Demontagemöglichkeiten eines Produktes sowie über die Handhabung am Ende seiner Lebensdauer liefern. Auch auf nationaler Ebene wird der „digitale Produktpass“ entsprechend weiter diskutiert und insbesondere in der Umweltpolitischen Digitalagenda

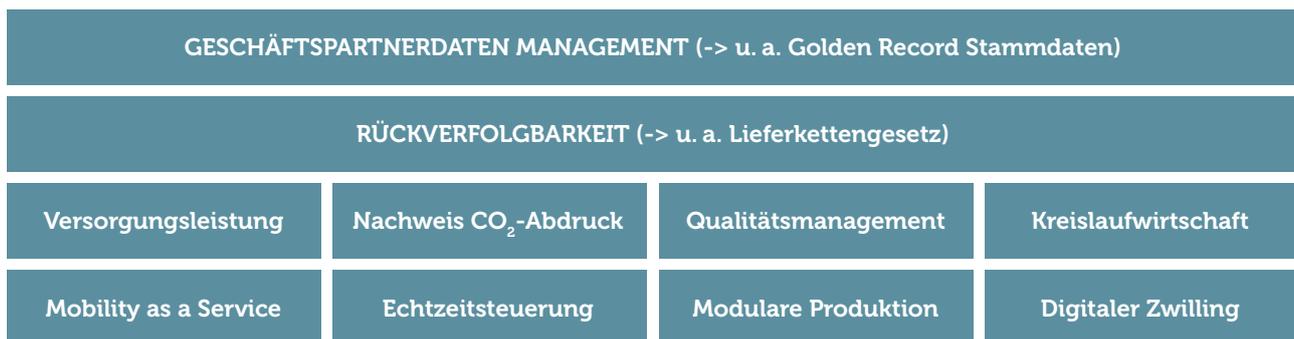
⁸² Laubinger et al. 2021.

des Bundesumweltministeriums als zentrale Maßnahme genannt.⁸³

Der digitale Produktpass ist dabei nach BMUV als Datensatz definiert, der die Komponenten, Materialien und chemischen Substanzen oder auch Informationen zu Reparierbarkeit, Ersatzteilen oder fachgerechter Entsorgung für ein Produkt zusammenfasst. Die Daten stammen dabei aus allen Phasen des Produktlebenszyklus und sollen für die Optimierung von Design, Herstellung, Nutzung und Entsorgung genutzt werden können. Die Strukturierung umweltrelevanter Daten in einem standardisierten, vergleichbaren Format soll es dabei allen Akteuren in der Wertschöpfungs- und Lieferkette ermöglichen, gemeinsam zielorientiert auf eine Kreislaufwirtschaft hinzuarbeiten. Der digitale Produktpass ist zugleich eine wichtige Grundlage für verlässlichere Konsumenteninformation und nachhaltige Konsumententscheidungen.

Auch wenn die Erfassung und Veröffentlichung von produktspezifischen Daten bereits seit vielen Jahren analysiert, gefordert und zum Teil in verschiedenen Kontexten schon umgesetzt wird, so ist die konkrete Diskussion um einen elektronischen beziehungsweise digitalen Produktpass noch relativ jung. Dabei muss zunächst berücksichtigt werden, dass die Idee eines Produktpasses anhand unterschiedlicher Begriffe und Kontexte diskutiert wird, wie etwa „digitaler Zwilling“, Ressourcen- beziehungsweise Materialpass, Umweltproduktdeklaration, Lebenszyklusakte, Kreislauf-/Recyclingpass etc. Die Konzepte hinter diesen Begriffen haben zwar oftmals einen ähnlichen Kernansatz, unterscheiden sich jedoch zum Teil in ihren konkreten Zielen und ihrer Ausführung. Für den Automobilbereich gibt es unter anderem das groß angelegte Catena X Projekt⁸⁴, das zahlreiche Schlüsselakteure zusammenbringt. Kreislaufwirtschaft ist dabei als einer der zehn primären Anwendungsfälle genannt, vgl. Abbildung 13.

Abbildung 13: Anwendungsfälle im Rahmen von Catena X entlang der Wertschöpfungskette



Quelle: Catena-X 2021

Eine der zentralen Herausforderungen wird darin bestehen, die verschiedenen Aktivitäten zu diesem Thema (mit Pilotprojekten sowohl im BMUV, im BMWK und dem BMBF) so zu koordinieren, dass sich daraus ein konsistenter Gesamtansatz entwickelt, der gleichzeitig die notwendigen Schnittstellen zu den Aktivitäten auf europäischer und internationaler Ebene aufweist.

3.3.3 Mindestzyklalquoten für Sekundärkunststoffe

Zusätzlich zur optimierten Bereitstellung von Daten wird es jedoch weiterer Anreize bedürfen, um die Industrie zu den notwendigen Investitionen in zirkuläre Infrastrukturen, Technologien und Geschäftsmodelle zu bewegen. Speziell im Kunststoffbereich hat sich in den vergangenen Jahren ein klarer Investitionsstau gezeigt, weil hohe Unsicherheiten über die tatsächliche Nachfrage herrschten.

Vor diesem Hintergrund setzt speziell die Europäische Kommission auf das Instrument der Mindestzyklalquoten: Nach entsprechenden Übergangsfristen sollen in Zukunft nur noch solche Produkte auf dem EU-Markt angeboten werden dürfen, die zu einem bestimmten Anteil aus recyceltem Kunststoff bestehen. Damit ergeben sich eine garantierte Nachfrage und folglich die Planungssicherheit für entsprechend hochwertige Anlagen. Erste Erfahrungen zeigen, dass damit Anreize für eine stärkere Integration der Wertschöpfungskette verbunden sein können, wenn der Zugriff auf entsprechende Stoffströme für Unternehmen zu einer strategischen Fragestellung führt, um zukünftig überhaupt noch am Markt tätig sein zu können. Konkret ist zum Beispiel im Verpackungsmarkt sichtbar, dass große Handelsketten wie die Schwarz-Gruppe oder Aldi sich an Kunststoffrecyclern beteiligen oder diese in die Konzernstruktur integrieren.

⁸³ Götz et al. 2021.

⁸⁴ Catena-X versteht sich als ein schnell skalierbares Ökosystem, in dem alle Beteiligten der automobilen Wertschöpfungskette gleichermaßen mitwirken. Das Ziel ist die Bereitstellung einer Umgebung für den Aufbau, Betrieb und die kollaborative Nutzung durchgängiger Datenketten entlang der gesamten automobilen Wertschöpfungskette, vgl. <https://catena-x.net/de/ueber-uns>.

Auch hier wird es auf einen intensiven Austausch mit der Industrie ankommen, was die konkrete Ausgestaltung solcher Instrumente angeht: Speziell sektorspezifische Mindestzyklusquoten müssen so ausgestaltet werden, dass sie nicht nur zu einem Abzug von Rezyklaten aus anderen Sektoren führen. Ebenso bedarf es klarer Kriterien, welche konkreten Abfallströme für solche Rezyklusquoten in Betracht kommen sollen – die Effekte wären zum Beispiel extrem unterschiedlich, je nach dem ob auch industrielle Abfälle angerechnet werden könnten.

3.3.4 System globaler Herstellerverantwortung inklusive auf Massebilanzen basierender Vorgaben zur Schließung einzelner Stoffkreisläufe

Komplementär dazu müsste auch die Ausgestaltung der Herstellerverantwortung der Fahrzeughersteller dringend an die realen Marktstrukturen angepasst werden: Wie dargestellt, wird es in Zukunft kaum noch vertretbar sein, dass Traktionsbatterien im großen Umfang für das Recycling verloren gehen, weil sie in den Zielländern von Gebrauchtwagen allein dem Marktgeschehen überlassen werden.

Ein möglicher Ansatz wäre die Verpflichtung der Hersteller, konkrete Anteile der von ihnen in Verkehr gebrachten Rohstoffe wieder zurückzugewinnen – unabhängig vom finalen Verbleib ihrer Fahrzeuge. Speziell die oben dargestellten Überlegungen zu digitalen Produktpässen könnten die Grundlage bieten, in Ergänzung zu Recyclingquoten auch solche Daten zu generieren, die die Einschätzung der tatsächlichen Kreislaufführung einzelner Rohstoffe ermöglichen.

Methodisch würden sich hier sogenannte Massenbilanz-Ansätze anbieten, wie sie aktuell speziell für Kunststoffe diskutiert werden:⁸⁵ Anstatt jedes einzelne Produkt verfolgen zu wollen, würde der Fokus damit im Sinne einer „chain of custody“ (zertifizierte Produktkette) auf Ebene der in Verkehr bringenden Unternehmen liegen.

Im Rahmen verbindlicher Selbstverpflichtungen sollte sich die Automobilindustrie zum Aufbau von Sammel- und Demontageinfrastrukturen in den Zielländern verpflichten, damit auch dort nicht nur die rentablen Fraktionen einer Verwertung zugeführt werden.

3.3.5 Optimierung der Sammellogistik für zentrale „circular workshops“ (Vorbild Renault)

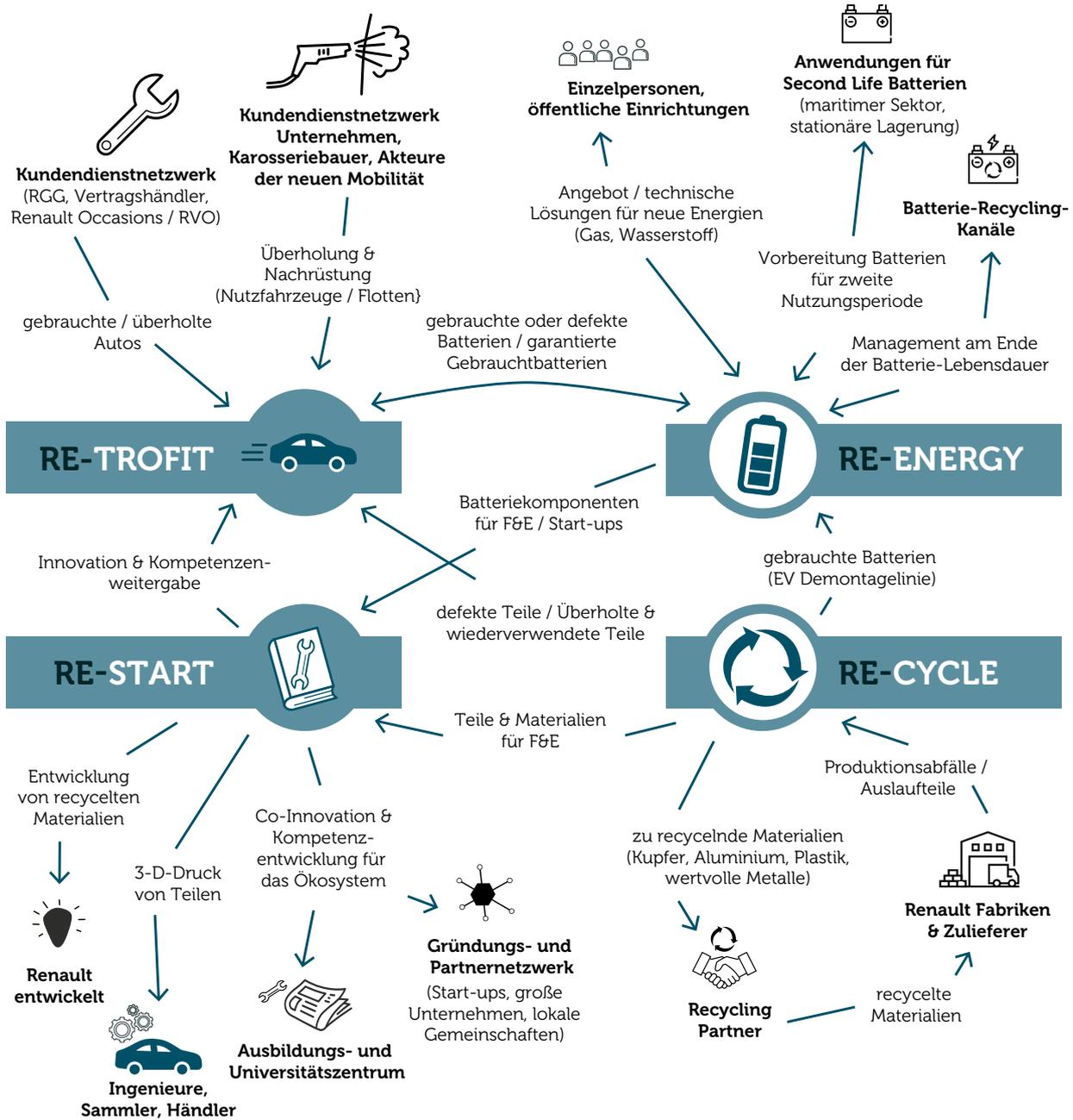
Ein Hemmnis ist wie dargestellt die Kleinteiligkeit der bisherigen Rücknahmestrukturen, die aufgrund fehlender Mengen oder finanzieller Ressourcen die Einführung umfassender Ansätze erschwert. Vor diesem Hintergrund sollten die deutschen Automobilhersteller möglichst gemeinsame Pilotprojekte starten, um solche Prozesse räumlich zu konzentrieren und damit rentabler zu machen. Orientierung hierfür könnten die Aktivitäten von Renault bieten, die eine solche „REFACTORY“ aufbauen und dort bis 2024 insgesamt 3.000 Mitarbeiter*innen beschäftigen wollen.⁸⁶ Abbildung 14 zeigt die vier wesentlichen Handlungsfelder, die den Kern der Tätigkeiten darstellen sollen – von der Wiederaufbereitung einzelner Komponenten über die Anpassung an neue Antriebsstrukturen bis hin zum Recycling.

⁸⁵ Tabrizi et al. 2021.

⁸⁶ Green Car Congress 2021; Groupe Renault 2020.

Abbildung 14: Handlungsfelder einer industriellen Fahrzeugverwertung

Vier miteinander verbundene Bereiche innerhalb eines Ökosystems von Material-, Dienstleistungs- und Qualifikationsströmen



Quelle: Groupe Renault 2020, S. 15, eigene Übersetzung

4

4. Mögliche Effekte auf die Wertschöpfungskette Automobilität

In Kapitel 4 sollen auf Basis der dargestellten Zirkularitätshebel sowie der regulatorischen Hemmnisse und darauf potenziell reagierender Instrumente erste Schlussfolgerungen zu Gesamteffekten auf die Wertschöpfungskette der Automobilität gezogen werden. Im Fokus von Kapitel 4.1 stehen strukturelle Veränderungen, in Kapitel 4.2 mögliche Arbeitsplatzeffekte und dafür notwendige Qualifikationsprofile.

4.1 Potenzielle Veränderungen der Wertschöpfung

Insgesamt zeigt sich, dass die Transformation zur Kreislaufwirtschaft mit erheblichen Veränderungen der Wertschöpfungsstruktur verbunden sein wird – und das in einem Sektor, der mit dem Wechsel vom Verbrennungsmotor zur batteriebetriebenen Elektromobilität ohnehin schon einen ganz massiven Veränderungsprozess durchläuft.

Betrachtet man den Status quo der noch stark linear geprägten Wertschöpfung einerseits und die regulatorischen Anforderungen und Impulse andererseits, so zeigt sich sehr klar, dass beide Themen unbedingt integriert betrachtet werden müssen! Angesichts der notwendigen Veränderungen der Geschäftsmodelle und der dafür notwendigen Investitionen kann es keine Lösung sein, quasi erst das eine und dann das andere Problem lösen zu wollen – insbesondere mit Blick auf den Erhalt zukunftsfähiger Arbeitsplätze sollte unbedingt eingefordert werden, dass Transformationskonzepte der Industrie Antworten auf beide Fragestellungen liefern; mittel- und langfristig ist sonst kaum vorstellbar, dass Deutschland und Europa ihre aktuell noch zentrale Stellung in dieser Wertschöpfungskette behalten werden.

Eine Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klima von 2019 verdeutlicht die Herausforderungen, vor der die Automobilbranche durch den Übergang zur Elektromobilität steht und verweist auf den erwartbaren Rückgang der Arbeitsplätze: „Sowohl in der Automobilindustrie als auch im Automobilhandel und Aftermarket sind bis 2040 jeweils bis zu 300.000 Arbeitsplätze gefährdet. Das entspricht etwa jeweils einem Drittel beziehungsweise der Hälfte der Beschäftigten im

Jahr 2017. [...] Bis 2040 werden in der deutschen Automobilindustrie, je nach Szenario, zwischen 130.000 und 300.000 der – auf Basis von Daten der Bundesagentur für Arbeit – 920.000 Arbeitsplätze im Jahr 2017 verlorengelassen. Im Automobilhandel und im Aftermarket sind noch einmal zwischen 250.000 und 300.000 der insgesamt 640.000 Arbeitsplätze gefährdet. Zusätzlich kann es in eng mit der Automobilindustrie verbundenen Industrien, wie zum Beispiel im Bereich der Metallerzeugnisse oder der Gummi- und Kunststoffwaren, bis 2030 zu einem weiteren Rückgang von 40.000 bis 70.000 Arbeitsplätzen kommen.“⁸⁷

Unbestreitbar werden viele der beschriebenen Hebel zu einem weiteren Rückgang der Nachfrage nach Neuwagen führen, weil Fahrzeuge entweder länger oder intensiver genutzt werden, insbesondere wegen der veränderten Geschäftsmodelle, die stärker auf die Nutzung als auf den Verkauf abzielen. Hier ist aber festzuhalten, dass sich in diesem Marktsegment ein intensiver globaler Wettbewerb entwickelt hat, der kaum noch rentabel ist.⁸⁸ Vor dem Hintergrund der beschriebenen Entwicklungen stellt sich damit die Frage der Zukunftssicherheit der dort verorteten Arbeitsplätze.

Die Beschreibung der Einzelhebel verdeutlicht, dass der Rückgang an Wertschöpfung absehbar kompensiert werden würde durch verschiedene Aktivitäten in den vor- und nachgelagerten Stufen der Wertschöpfung:

- Die jetzt beginnende Entwicklung zirkulärer Design- und Produktionskonzepte wird eine enorme Nachfrage nach einem entsprechenden Know-how erzeugen. Hier ist Deutschland wegen der engen Verbindung zur breiten Forschungslandschaft sehr gut aufgestellt.
- In den nachgelagerten Stufen bei der industriellen Aufbereitung sowie bei Reparatur- und Recyclingdienstleistungen werden absehbar auch in der Breite neue Arbeitsplätze entstehen, die den Rückgang bei den OEMs und in der Zulieferindustrie zumindest kompensieren sollten.

⁸⁷ Hagedorn et al. 2019.

⁸⁸ Cambridge Econometrics, Trinomics, and ICF 2018.

- Ein gemischtes Bild ergibt sich bei den Ansätzen, bestehende Rohstoffe durch zirkuläre Alternativen zu ersetzen. Hier kann es zu einer stärkeren Regionalisierung der Wertschöpfung kommen, gleichzeitig wird der Nachfragerückgang nach Neufahrzeugen aber auch in der klassischen Rohstoffindustrie zu Umstrukturierungen führen müssen.
- Ebenso unklar sind die Effekte im Bereich der digitalisierten Dienstleistungen beziehungsweise bei neuen datenökonomischen Geschäftsmodellen. Hier werden in den nächsten Jahren mit Sicherheit zahlreiche neue Unternehmen entstehen – die aber nicht zwangsläufig in Deutschland oder Europa angesiedelt sein müssen. Diese Form von digitalisierter Wertschöpfung birgt das Risiko, dass sie zu großen Teil auch in den globalen Zentren wie Indien, Israel oder Kalifornien erbracht werden könnte. Hier bietet zum Beispiel die Digitalagenda des BMUV verschiedene Anknüpfungspunkte, auch für kreislaforientierte Ansätze entsprechende Rahmenbedingungen in Deutschland zu entwickeln – ob und wie diese in den kommenden Jahren aber in die Praxis umgesetzt werden können, ist noch mit erheblichen Unsicherheiten verbunden.

Die direkten Effekte könnten also zu einem insgesamt leicht positiven Gesamteffekt führen, dessen Höhe stark von der politischen Flankierung abhängen wird, etwa der genauen Ausgestaltung einer nationalen Kreislaufwirtschaftsstrategie, wie sie im aktuellen Koalitionsvertrag angekündigt wurde und derzeit vorbereitend diskutiert wird.

Zentrale indirekte Effekte könnten sich dabei insbesondere auf die Nachfrage für den deutschen Maschinen- und Anlagenbau ergeben: Die Produktion und der Einsatz von

Rezyklaten, neue auf Langlebigkeit ausgerichtete Designkonzepte oder industrialisierte Demontageprozesse werden innovative Anlagentechnik erfordern. Hier sind deutsche Unternehmen hervorragend aufgestellt und würden im ersten Schritt von Aufträgen aus Deutschland profitieren. Mittel- und langfristig wäre zentral, dass auch weiterhin die wichtigen Industriestandards in Deutschland entwickelt werden. Die gemeinsame Entwicklung von Standards und darauf ausgerichteter Anlagentechnik war in den 1990er Jahren die zentrale Erfolgsvoraussetzung für die Vorreiterrolle Deutschlands im Bereich der Kreislaufwirtschaft (zum Beispiel durch die Einführung des Grünen Punkts oder des Dosenpfands). Sollten solche Standards in den Niederlanden oder noch wahrscheinlicher in China entwickelt werden, würde damit eine zentrale Basis für die Anlagen erodieren.⁸⁹ Blickt man auf Patentanmeldungen als einen der zentralen Vorlaufindikatoren, so zeigt sich bereits, dass Deutschland an Boden verliert. Insofern drängt die Zeit, wenn Deutschland seine im Prinzip sehr guten Ausgangsbedingungen auch in langfristige Wertschöpfung umsetzen will. Ohne zeitnahe nächste Schritte drohen sowohl zukünftige Potenziale als auch die Grundlage für wichtige Wertschöpfung in anderen Bereichen in andere Regionen abzuwandern.

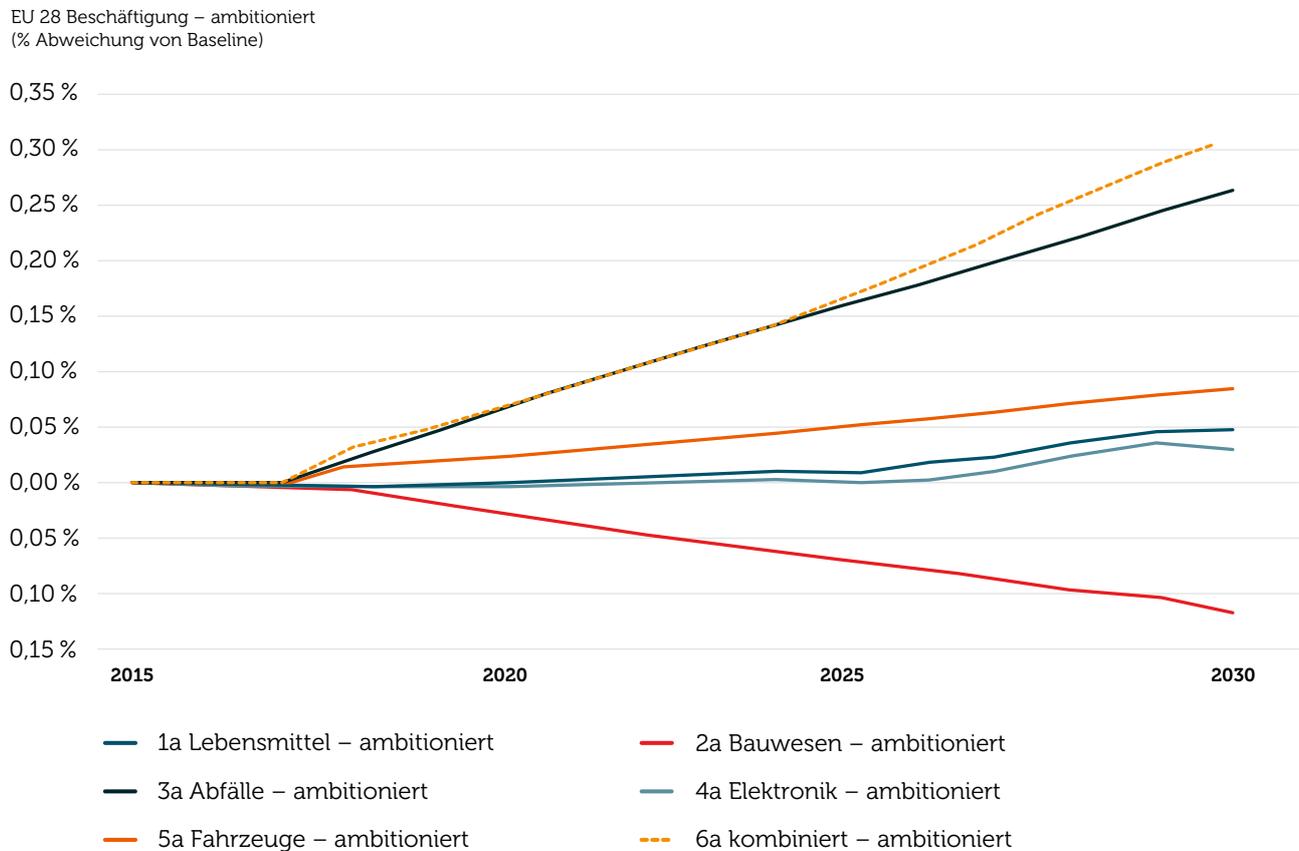
4.2 Arbeitsplatzeffekte und Qualifikationsbedarfen

Diese qualitativen Einschätzungen werden unter anderem durch Modellierungen der Arbeitsplatzeffekte der Kreislaufwirtschaft im Auftrag der Europäischen Kommission bestätigt. Abbildung 15 zeigt die Ergebnisse der Analyse einer ambitionierten Kreislaufwirtschafts-Transformation:⁹⁰ Gegenüber einem Referenz-Szenario würde es hier zu leicht positiven Arbeitsplatzeffekten kommen. Die indirekten Effekte auf den Maschinenbau sind noch nicht berücksichtigt.

⁸⁹ Vgl. DIN CE Normungsroadmap.

⁹⁰ Cambridge Econometrics, Trinomics, and ICF 2018.

Abbildung 15: Auswirkungen auf die Beschäftigung in der EU in den Szenarien der Kreislaufwirtschaft (in % der Basis)



Quelle: Cambridge Econometrics, Trinomics, and ICF 2018, S. 40

Deutlicher Forschungsbedarf besteht noch mit Blick auf die dabei konkret entstehenden Arbeitsplätze beziehungsweise die Stellen, die im Gegenzug wegfallen würden. Untersuchungen für Großbritannien haben ergeben, dass im Übergang zur Kreislaufwirtschaft vor allem Arbeitsplätze mit niedrigen bis mittleren Qualifikationsprofilen entstehen, zum Beispiel in der Sammlung und Verwertung von Abfällen. Mittlere bis höherwertige Jobs könnten zum Beispiel in der Refabrikation entstehen, hinzu könnten Jobs im Kontext der Digitalisierung kommen oder bei biobasierten Materialalternativen ein höherer Anteil an hoch qualifizierten Jobs.⁹¹

Eine der zentralen Herausforderungen gerade für die Gewerkschaften wird es sein, mit Blick auf solche Ver-

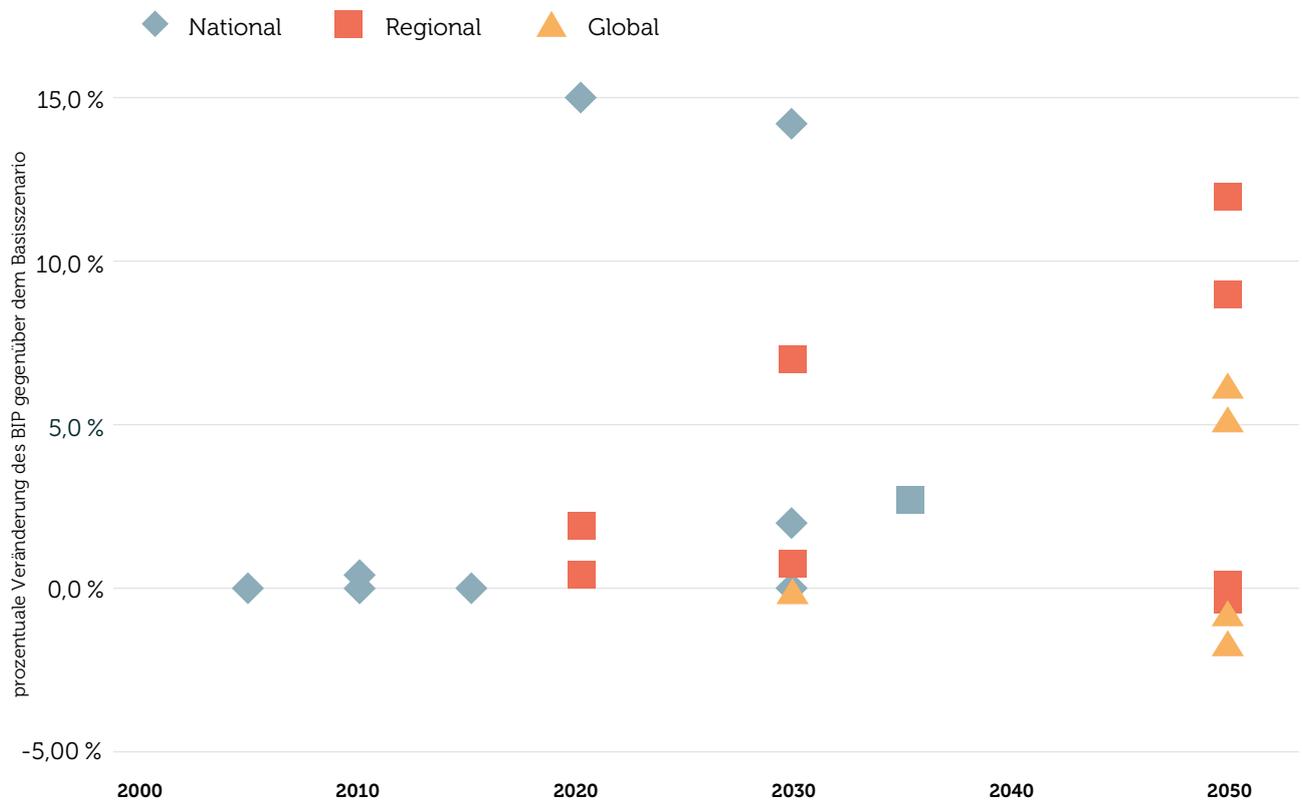
änderungsprozesse konkrete Qualifizierungsbedarfe zu definieren. Untersuchungen, unter anderem von der Handwerkskammer Münster, haben gezeigt, dass vor allem im Handwerk noch erheblicher Handlungsbedarf besteht: Gerade den KMU wird die Notwendigkeit solcher Qualifikationsprofile zunehmend bewusst, es fehlt jedoch an flächendeckenden Angeboten, die hier konkrete Fähigkeiten vermitteln würden.⁹² Im universitären Bereich sind erst in den vergangenen Jahren breiter angelegte Studienangebote im Bereich der Kreislaufwirtschaft entwickelt worden. Es wird also einige Jahre dauern, bis entsprechend ausgebildete Fachkräfte am Markt verfügbar sein werden. EU-geförderte Projekte wie TICHE versuchen daher, stärker auf berufsbegleitende Formate zu setzen und dort entsprechende Angebote zu entwickeln.⁹³

⁹¹ Green Alliance 2016

⁹² Handwerkskammer Münster o. J.

⁹³ TICHE Academy o. J.

Abbildung 16: Prozentuale Veränderungen des BIP im Vergleich verschiedener Kreislaufwirtschafts-Modellierungen



Quelle: OECD 2018, S. 40

Ohne massive Investitionen auch in berufsbegleitende Aus- und Weiterbildungsangebote wird der steigende Bedarf an Fachkräften in den nächsten Jahren nicht abgedeckt werden können. Dies birgt ein erhebliches Risiko, da die Transformation zur Kreislaufwirtschaft erkennbar nicht nur Gewinnerregionen, sondern auch Verlierer produzieren wird. Abbildung 16 zeigt Ergebnisse einer Metastudie der OECD,⁹⁴ nach der die meisten Stu-

dien von begrenzten positiven Effekten auf globaler Ebene ausgehen – regional aber deutliche BIP-Steigerungen möglich sein könnten. Dementsprechend werden sich einige Regionen auch mit abwandernder Wertschöpfung konfrontiert sehen. Deutschland steht hier vor gewaltigen Aufgaben, wenn es gerade im Automobilbereich nicht den Anschluss verlieren will.

⁹⁴ OECD 2018.

5

5. Kernergebnisse und Ausblick

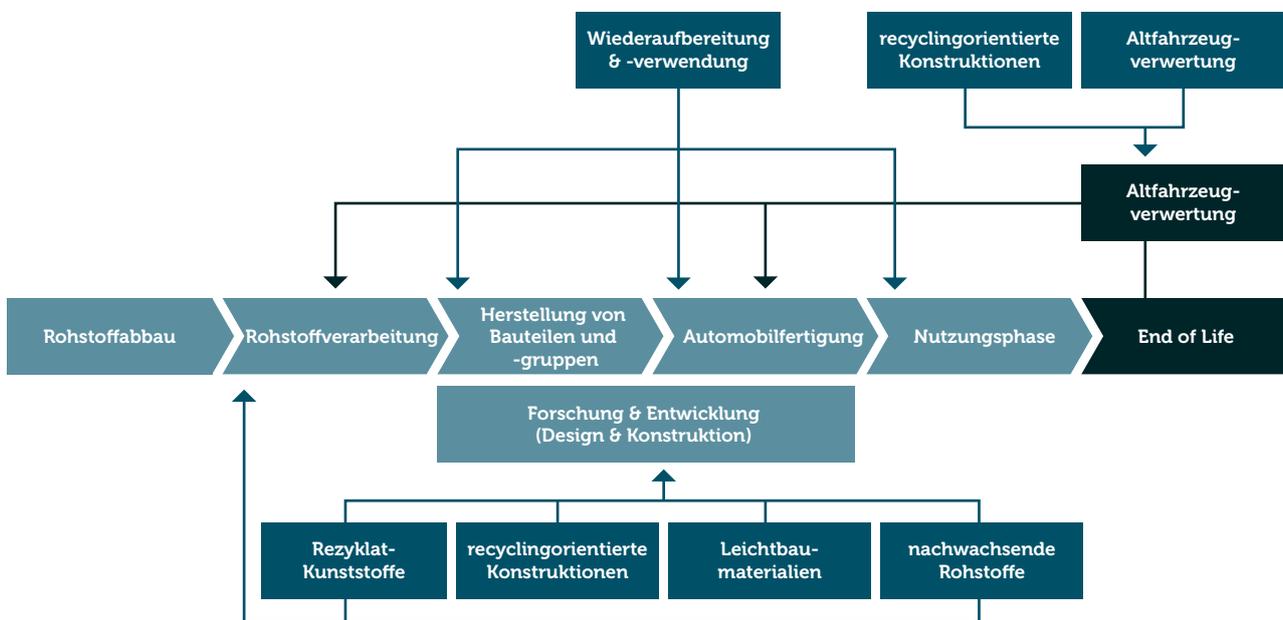
Die Ausführungen dieser Studie verdeutlichen den enormen Handlungsdruck im Bereich Automotive, von linear geprägten Strukturen in Richtung einer Kreislaufwirtschaft zu kommen – sowohl aus ökologischen als auch aus sozio-ökonomischen Gründen. Die zukünftige Wettbewerbsfähigkeit gerade der deutschen Automobilindustrie wird auch davon abhängen, beim Thema einer zirkulären Automobilität eine globale Führungsposition zu erlangen.

Es mangelt dafür wie dargestellt nicht an technischen Lösungsansätzen. Hier ist Deutschland mit seiner exzellenten Forschungslandschaft in den Ingenieurwissenschaften und dem starken Maschinenbausektor sehr gut aufgestellt. Die Herausforderung wird vielmehr darin bestehen, die verschiedenen Stakeholder stärker miteinander zu koordinieren, Prozesse abzustimmen und eine gemeinsame Vision zu entwickeln, wie der Automobil-

standort Deutschland von den aktuellen fundamentalen Veränderungsprozessen (neben der Zirkularität auch der Wechsel zur Elektromobilität) profitieren kann. Ziel muss es dabei sein, die Wertschöpfungstiefe in Deutschland zu erhöhen und gleichzeitig sowohl den Verlust als auch den Abfluss von eigentlich dringend benötigten Rohstoffen zu minimieren. Notwendig dafür sind auch neue zirkuläre Kompetenzprofile, die über innovative Aus- und Weiterbildungsangebote geschaffen werden müssen.

Abbildung 17 verdeutlicht den Bedarf eines solchen stärker koordinierten Vorgehens: Die einzelnen, in dieser Studie dargestellten Ansätze wirken nicht isoliert, sondern müssen simultan an verschiedenen Punkten der Wertschöpfungskette ansetzen, um so die notwendigen Synergien für eine ausreichend schnelle Transformation in Richtung Kreislaufwirtschaft zu ermöglichen.

Abbildung 17: Ansatzpunkte zur Transformation in Richtung Kreislaufwirtschaft



Quelle: eigene Darstellung

Ein zentraler Ansatzpunkt dafür ist der im April 2023 gestartete Prozess zur Entwicklung einer Nationalen Kreislaufwirtschaftsstrategie. Sie soll als eine Art „Rahmenstrategie“ sowohl die Fragen einer zukünftigen Abfallinfrastruktur für Altfahrzeuge als auch Aspekte der Rohstoffsicherung in

einen konsistenten Gesamtrahmen überführen. Die vorliegende Studie könnte dabei Grundlage für Inputs insbesondere zum Runden Tisch Fahrzeuge darstellen.

Literaturverzeichnis

- acatech/Circular Economy Initiative Deutschland/SYSTEMIQ Circular Economy Initiative Deutschland (Hrsg.) (2021):** Kunststoffverpackungen im geschlossenen Kreislauf – Potenziale, Bedingungen, Herausforderungen. DOI:10.48669/ceid_2021-5
- acatech/Circular Economy Initiative Deutschland/SYSTEMIQ (Hrsg.) (2020):** Ressourcenschonende Batteriekreisläufe – mit Circular Economy die Elektromobilität antreiben. https://static1.squarespace.com/static/5b52037e4611a0606973bc79/t/61c1e81198888f458b7f6928/1640097828070/TB+Gesamtbericht+DE_DOI.pdf (abgerufen am 31. Mai 2023)
- Akerlof, G. A. (1970):** The Market for Lemons: Quality Uncertainty and the Market Mechanism. In: Quarterly Journal of Economics. Band 84, Nr. 3, 1970, S. 488–500.
- anp management consulting GmbH (2020):** PIAE – Plastics in Automotive Engineering 2020. In: GAK 4/2020 – Jahrgang 73. https://www.anp-consulting.com/wp-content/uploads/2021/03/gak_ausgabe_04_2020_jahrgang_73.pdf (abgerufen am 31. Mai 2023)
- Auto Recycling Nederland (2020):** Bio-based plastic is emerging for the automotive industry. <https://arn.nl/en/bio-based-plastic-is-emerging-for-the-automotive-industry/> (abgerufen am 31. Mai 2023)
- Bergsma, G.; Lindgreen, E. R. (2018):** Summary of Ioniqa LETWA Screening Carbon Footprint Analysis, 2018. <https://www.cedelft.eu/en/publications/2154/summary-of-ioniqa-lca-screening-carbon-footprint-analysis> (abgerufen am 31. Mai 2023)
- Bhattacharya, D. (2013):** Niobium Containing Advanced High Strength Steels for Automotive Applications – Processing, Microstructure, and Properties. In: Materials Science Forum. Ausgabe: 773-774. S. 325–335. <https://www.scientific.net/MSF.773-774.325> (abgerufen am 31. Mai 2023)
- Bienge, K.; Suski, P. (2017):** Ressourceneffizienzpotenzialanalyse von Nutzen statt Besitzen Angeboten. Wuppertal Institut. https://wupperinst.org/fa/redaktion/downloads/projects/NsBRess_Mobilitaet.pdf (abgerufen am 31. Mai 2023)
- Birnstengel et al. (2020):** Statusbericht der deutschen Kreislaufwirtschaft 2020. Prognos AG und INFA GmbH. https://statusbericht-kreislaufwirtschaft.de/wp-content/uploads/2020/11/2020_Statusbericht_mobil.pdf (abgerufen am 31. Mai 2023)
- BMU (o. J.) Altfahrzeug-Richtlinie – Gesetzgebung der Europäischen Union.** <https://www.bmu.de/themen/wasser-ressourcen-abfall/kreislaufwirtschaft/abfallarten-abfallstroeme/altfahrzeuge/gesetzgebung-der-europaeischen-union-altfahrzeug-richtlinie> (abgerufen am 25. Februar 2021)
- Bringezu et al. (2017):** Assessing global resource use: A systems approach to resource efficiency and pollution reduction (A Report of the International Resource Panel). <https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/22583/Full%20Report%20-%20Assessing%20Global%20Resource%20Use.pdf> (abgerufen am 9. Juni 2023)
- Buhl, J. (2014):** Revisiting Rebound Effects from Material Resource Use. Indications for Germany Considering Social Heterogeneity. Resources 3, 106–122. DOI:10.3390/resources3010106
- Bundesamt für Wirtschaft und Energie BMWi (Hrsg.) (2020):** IKT-Branche 2018 – Volkswirtschaftliche Kennzahlen, Innovations- und Gründungsgeschehen. In: Leibniz Zentrum für Europäische Wirtschaftsforschung, (2020), S. 20. https://www.de.digital/DIGITAL/Redaktion/DE/Publikation/ikt-branche-2018.pdf?__blob=publicationFile&v=3 (abgerufen am 31. Mai 2023)
- Bundesverband CarSharing (2022):** CarSharing-Statistik 2022 – CarSharing ist auf Wachstumskurs. <https://carsharing.de/presse/pressemitteilungen/carsharing-statistik-2022-carsharing-ist-auf-wachstumskurs> (abgerufen am 31. Mai 2023)
- Buruzs, A.; Torma, A. (2018):** A Review on the Outlook of the Circular Economy in the Automotive Industry. In: International Journal of Environmental and Ecological Engineering, 11 (2018), 6, S. 576–580. <https://publications.waset.org/10008699/a-review-on-the-outlook-of-the-circular-economy-in-the-automotive-industry> (abgerufen am 31. Mai 2023)

BMW AG (2009): Fahrzeugrecycling. https://www.bmw.de/content/dam/bmw/marketDE/bmw_de/topics/offers-and-services/pdf/recycling-flyer.pdf.asset.1511746057841.pdf (abgerufen am 31. Mai 2023)

Bobba, S.; Mathieux, F.; Blengini, G. A. (2019): How will second-use of batteries affect stocks and flows in the EU? A model for traction Li-ion batteries, *Resources, Conservation and Recycling*, Volume 145, 2019, S. 279–291, ISSN 0921-3449, DOI:10.1016/j.resconrec.2019.02.022

Braun et al. (2021): Chancen und Risiken im Automobilsektor für die Umsetzung einer klimaneutralen und ressourceneffizienten zirkulären Wirtschaft. Vorstudie im Rahmen des Verbundvorhabens Circular Economy als Innovationsmotor für eine klimaneutrale und ressourceneffiziente Wirtschaft (CEWI). Wuppertal Institut. https://epub.wupperinst.org/frontdoor/deliver/index/docId/7850/file/7850_automobilsektor.pdf (abgerufen am 31. Mai 2023)

Buchert, M.; Dolega, P.; Degreif, S. (2019): Gigafactories für Lithium-Ionen-Zellen – Rohstoffbedarfe für die globale Elektromobilität bis 2050. Kurzstudie erstellt im Rahmen des BMBF Verbundprojektes Fab4Lib – Erforschung von Maßnahmen zur Steigerung der Material- und Prozesseffizienz in der Lithium-Ionen-Batteriezellproduktion über die gesamte Wertschöpfungskette. Öko-Institut e.V. Darmstadt. <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Fab4Lib-Rohstoffe-Elektromobilitaet.pdf> (abgerufen am 31. Mai 2023)

Bundesministerium für Umwelt (2019): Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU): Kohlenstoffdioxid-Fußabdruck pro Kopf in Deutschland. <https://www.bmu.de/media/kohlenstoffdioxid-fussabdruck-pro-kopf-in-deutschland> (abgerufen am 31. Mai 2023)

Cambridge Econometrics, Trinomics, and ICF (2018): Impacts of circular economy policies on the labour market. Final report and Annexes. European Union (Hrsg). Luxembourg. <http://trinomics.eu/wp-content/uploads/2018/07/Impacts-of-circular-economy-on-policies-on-the-labour-market.pdf> (abgerufen am 31. Mai 2023)

Catena-X (2021): Catena-X. Automotive Network – Building the First Operating System for a Data Driven Value Chain. https://www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/DE/Downloads/Publikation/Datenraum_i40_Catena-X_PPT.pdf?__blob=publicationFile&v=1 (abgerufen am 31. Mai 2023)

cirplus GmbH (2020): DIN SPEC 91446 – Der neue Standard für recycelten Kunststoff vereinfacht die Beschaffung und stellt Qualität sicher. <https://www.cirplus.com/de/din-spec-91446> (abgerufen am 31. Mai 2023)

Continental AG (2019): Michelin, Continental und SMAG gründen Joint Venture für mehr Nachhaltigkeit in der Naturkautschukindustrie. <https://www.continental.com/de/nachhaltigkeit/news/archiv/news-2019/2019-09-12-rubberway/>

Conversio (2020): Stoffstrombild Kunststoffe in Deutschland 2019. <https://www.vci.de/ergaenzende-downloads/kurzfassung-stoffstrombild-kunststoffe-2019.pdf> (abgerufen am 31. Mai 2023)

Daimler AG (2014): Entwicklung eines realisierbaren Recyclingkonzeptes für die Hochleistungsbatterien zukünftiger Elektrofahrzeuge. https://www.erneuerbar-mobil.de/sites/default/files/publications/abschlussbericht-libri_1.pdf (abgerufen am 31. Mai 2023)

DIN (Deutsches Institut für Normung e. V) o. J.: Normungsroadmap Circular Economy. <https://www.din.de/de/forschung-und-innovation/themen/circular-economy/normungsroadmap-circular-economy/normungsroadmap-circular-economy-801630> (abgerufen am 31. Mai 2023)

Ellen MacArthur Foundation (2015): Towards a circular economy business rationale for an accelerated transition. <https://ellenmacarthurfoundation.org/towards-a-circular-economy-business-rationale-for-an-accelerated-transition> (abgerufen am 31. Mai 2023)

Elsner et al. (2021): Kunststoffverpackungen im geschlossenen Kreislauf – Potenziale, Bedingungen, Herausforderungen. acatech/Circular Economy Initiative Deutschland/SYSTEMIQ (Hrsg.). https://static1.squarespace.com/static/5b52037e4611a0606973bc79/t/61c1e6fc7c5ca3018718e8d/1640097555427/VP+Gesamtbericht+DE_DOI.pdf

Encory (o. J.): Startseite. <https://encory.com/de/> (abgerufen am 31. Mai 2023)

elementenergy (2019): Batteries on wheels: the role of battery electric cars in the EU power system and beyond. https://www.transportenvironment.org/wp-content/uploads/2021/07/2019_06_Element_Energy_Batteries_on_wheels_Public_report.pdf (abgerufen am 12.06.2023)

Europäische Kommission (2020): Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen. Ein neuer Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft Für ein saubereres und wettbewerbsfähigeres Europa. Brüssel. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=COM:2020:98:FIN> (abgerufen am 31. Mai 2023)

Europäische Kommission (2018): Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. EU Policy Framework for Biobased, Biodegradable, and Compostable Plastics. https://environment.ec.europa.eu/publications/communication-eu-policy-framework-biobased-biodegradable-and-compostable-plastics_en (abgerufen am 31. Mai 2023)

Europäische Kommission (2020a): Vorschlag für eine VERORDNUNG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES über Batterien und Altbatterien, zur Aufhebung der Richtlinie 2006/66/EG und zur Änderung der Verordnung (EU) 2019/1020. COM/2020/798 final. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX:52020PC0798> (abgerufen am 31. Mai 2023)

Europäische Kommission (2022a): Fragen und Antworten – Mitteilung über einen politischen Rahmen für biobasierte, biologisch abbaubare und kompostierbare Kunststoffe. https://ec.europa.eu/commission/presscorner/api/files/document/print/de/qanda_22_7158/QANDA_22_7158_DE.pdf. (abgerufen am 31. Mai 2023)

Europäische Kommission (2022b): Proposal for Ecodesign for Sustainable Products Regulation. https://environment.ec.europa.eu/publications/proposal-ecodesign-sustainable-products-regulation_de (abgerufen am 31. Mai 2023)

Geres, R.; Kohn, A.; Lenz, S.; Ausfelder, F.; Bazzanella, A. M.; Möller, A. (2019): Roadmap Chemie 2050 – Auf dem Weg zu einer treibhausgasneutralen chemischen Industrie in Deutschland, <https://www.vci.de/vci/downloads-vci/publikation/2019-10-09-studie-roadmap-chemie-2050-treibhausgasneutralitaet.pdf> (abgerufen am 31. Mai 2023)

Goldie-Scot (2019): A Behind the Scenes Take on Lithium-ion Battery Prices. https://green-alliance.org.uk/wp-content/uploads/2021/11/Employment-and-the-circular-economy_infographic.pdf (abgerufen am 31. Mai 2023)

Green Alliance (2016): Employment and the Circular Economy. https://green-alliance.org.uk/wp-content/uploads/2021/11/Employment-and-the-circular-economy_infographic.pdf (abgerufen am 31. Mai 2023)

Green Car Congress (2020): Groupe Renault creating first European factory dedicated to the circular economy of mobility in Flins. BioAge Group. <https://www.greencarcongress.com/2020/11/20201126-renault.html> (abgerufen am 31. Mai 2023)

Groke et al. (2017): Optimierung der Separation von Bauteilen und Materialien aus Altfahrzeugen zur Rückgewinnung kritischer Metalle (ORKAM). Callparts Recycling GmbH/Ökopool GmbH Institut für Ökologie und Politik/ELPRO Elektronik-Produkt Recycling GmbH. Im Auftrag des Umweltbundesamtes. TEXTE 02/2017. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1/publikationen/2017-01-11_texte_02-2017_orkam_endbericht.pdf (abgerufen am 31. Mai 2023)

Groupe Renault (2020): Re-Factory Flins – Groupe Renault. Press Release. <https://media.renaultgroup.com/groupe-renault-creates-the-first-european-factory-dedicated-to-the-circular-economy-of-mobility-in-flins/?lang=eng> (abgerufen am 31. Mai 2023)

Gsell et al. (2015): Nutzen statt Besitzen: Neue Ansätze für eine Collaborative Economy. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/nutzen-statt-besitzen-neue-ansaeetze-fuer-eine> (abgerufen am 31. Mai 2023)

Götz, T.; Adisorn, T.; Tholen, L. (2021): Der Digitale Produktpass als Politik-Konzept. Kurzstudie im Rahmen der Umweltpolitischen Digitalagenda des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU). Wuppertal Institut. Wuppertal.

Hagedorn, M.; Hartmann, S.; Heilert, D.; Harter, C.; Olschewski, I.; Eckstein, L.; Baum, M.; Henzelmann, T.; Schlick, T.; Seid, M.; Yoon, M. (2019): Automobile Wertschöpfung 2030/2050. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie. Endbericht. IPE Institut für Politikevaluation GmbH, fka GmbH und Roland Berger GmbH. https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Studien/automobile-wertschoepfung-2030-2050.pdf?__blob=publicationFile&v=16 (abgerufen am 31. Mai 2023)

Handwerkskammer Münster (o. J.): Zirkuläre Wertschöpfung. <https://www.hwk-muenster.de/de/betriebsfuehrung/nachhaltigkeit-umwelt-energie/zirkulaere-wertschoepfung> (abgerufen am 31. Mai 2023)

- infas, DRL und IVT (2019):** Mobilität in Deutschland. https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Anlage/G/mid-er-gebnisbericht.pdf?__blob=publicationFile (abgerufen am 31. Mai 2023)
- IN4climate.NRW (Hrsg.) (2020):** Chemisches Kunststoffrecycling – Potenziale und Entwicklungsperspektiven. Ein Beitrag zur Defossilisierung der chemischen und kunststoffverarbeitenden Industrie in NRW. Ein Diskussionspapier der Arbeitsgruppe Circular Economy. Gelsenkirchen.
- Interseroh Plus (o. J.):** Aldi Verpackungsoptimierung. Referenzen. <https://www.interseroh.plus/mitgestalten/referenzen/aldi-verpackungsoptimierung/> (abgerufen am 31. Mai 2023)
- Kahlert, S., & Bening, C. R. (2022):** Why pledges alone will not get plastics recycled: Comparing recycle production and anticipated demand. In: Resources, Conservation and Recycling, S. 181, 106279.
- Kampker, A; Heimes, H. H.; Ordnung, M.; Lienemann, C.; Hollah, A.; Sarovic, N. (2016):** Evaluation of a Remanufacturing for Lithium Ion Batteries from Electric Cars. World Academy of Science, Engineering and Technology. International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering. Vol:10, No:12. DOI:10.5281/zenodo.1128215
- Krasnushkina, N. (2017):** Alternative zu Kautschuk: Löwenzahn gibt Gummi. <https://www.handelsblatt.com/technik/energie-umwelt/circular-economy/alternative-zu-kautschukloewenzahn-gibt-gummi/20472456.html> (abgerufen am 31. Mai 2023)
- Kurdve, M.; Zackrisson, M.; Johansson, M.I.; Ebin, B.; Harlin, U. (2019):** Considerations when Modelling EV Battery Circularity Systems. Batteries 2019, 5, 40. DOI:10.3390/batteries5020040
- Lechleitner et al. (2020):** Chemisches Recycling von gemischten Kunststoffabfällen als ergänzender Recyclingpfad zur Erhöhung der Recyclingquote. Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft 72, 47–60. DOI:10.1007/s00506-019-00628-w
- Laubinger et al. (2021):** Modulated fees for Extended Producer Responsibility schemes (EPR), OECD Environment Working Papers, No. 184, OECD Publishing, Paris, DOI:10.1787/2a42f54b-en.
- Material Economics (2018):** The Circular Economy – a Powerful Force for Climate Mitigation. <https://material-economics.com/publications/the-circular-economy-a-powerful-force-for-climate-mitigation-1> (abgerufen am 31. Mai 2023)
- Melin, H. E. (2019):** State-of-the-art in Reuse and Recycling of Lithiumion Batteries. <https://www.energi-myndigheten.se/globalassets/forskning--innovation/overgripande/state-of-the-art-in-reuse-and-recycling-of-lithium-ion-batteries-2019.pdf> (abgerufen am 31. Mai 2023)
- Nessi S.; Sinkko T.; Bulgheroni C.; Garcia-Gutierrez P.; Giuntoli J.; Konti A.; Sanye-Mengual E.; Tonini D.; Pant R., Marelli L. (2020):** Comparative Life Cycle Assessment (LCA) of Alternative Feedstock for Plastics Production – Part 2, European Commission, Ispra, DOI:10.2760/271095.
- OECD (2018):** The Marcoeconomics of the circular economy transition: A critical review of modelling approaches – Environment Working Paper No. 130. [https://www.oecd.org/officialdocuments/publicdisplaydocumentpdf/?cote=ENV/WKP\(2018\)4&docLanguage=En](https://www.oecd.org/officialdocuments/publicdisplaydocumentpdf/?cote=ENV/WKP(2018)4&docLanguage=En) (abgerufen am 31. Mai 2023)
- PreZero (o. J.):** Über PreZero. Unternehmen. <https://pre-zero.de/ueber-prezero/unternehmen> (abgerufen am 31. Mai 2023)
- Richa, K.; Babbitt, C. W.; Gaustad, G. (2017):** Eco-Efficiency Analysis of a Lithium-Ion Battery Waste Hierarchy Inspired by Circular Economy. In: Journal of Industrial Ecology, 21: 3, 2017, S. 715–730.
- Sander, K.; Gößling-Reisemann, S.; Zimmermann, T.; Marscheider-Weidemann, F.; Wilts, H.; Schebeck, L.; Wagner, J.; Heegn, H.; Pehlken, A. (2017):** Recyclingpotenzial strategischer Metalle (ReStra). TEXTE 68/2017. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau.
- Schulz, E. (2020):** Sonderabfallwissen. Recycling und Entsorgung von E-Auto-Batterien. <https://www.sonderabfall-wissen.de/wissen/recycling-und-entsorgung-von-e-auto-batterien/> (abgerufen am 31. Mai 2023)
- Steffen et al (2015):** Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. In: Science 347 (6223), 1259855. S. 736–746.
- Stephan, B.; Lee, I.; Kim, J. (2019):** Crashing the Climate: How Car Industry is Driving the Climate Crisis. In Greenpeace East Asia and Germany: (2019), S. 44.

Tabrizi, S.; Crêpy, M.; Rateau, F. (2021): Recycled content in plastics. The mass balance approach. https://zerowaste-europe.eu/wp-content/uploads/2021/05/rpa_2021_mass_balance_booklet-2.pdf (abgerufen am 31. Mai 2023)

Teslamag (2021): Tesla-Analysten: Vorteil von Giga-Pressen nicht riesig, trotzdem für jedes zweite Elektroauto. <https://teslamag.de/news/tesla-analysten-vorteile-giga-pressen-nicht-riesig-trotzdem-50-prozent-elektroautos-41952> (abgerufen am 31. Mai 2023)

TICHE Academy (o. J.): Startseite. <https://tiche-academy.eu/> (abgerufen am 31. Mai 2023)

Tsiropoulos, I.; Tarvydas, D.; Zucker, A. (2018): Cost development of low carbon energy technologies: Scenario-based cost trajectories to 2050, 2017 edition. <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC109894> (abgerufen am 31. Mai 2023)

Umweltbundesamt (UBA) (2023a): Altfahrzeugverwertung und Fahrzeugverbleib. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/ressourcen-abfall/verwertung-entsorgung-ausgewaehlter-abfallarten/altfahrzeugverwertung-fahrzeugverbleib#2019-knapp-eine-halbe-million-altfahrzeuge> (abgerufen am 31. Mai 2023)

Umweltbundesamt (2022): Umweltschadstoffe. Altfahrzeugverwertung. Umweltschadstoffe. <https://www.umweltbundesamt.de/umweltschadstoffe-fuer-den-alltag/mobilitaet/altfahrzeugverwertung> (abgerufen am 31. Mai 2023)

Umweltbundesamt (2023b): Emissionen des Verkehrs. Umweltschadstoffe. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/verkehr/emissionen-des-verkehrs> (abgerufen am 31. Mai 2023)

Verkehrsrundschau.de (2020): Klimaschutzbericht: CO₂-Emissionen im Verkehr gestiegen. <https://www.verkehrsrundschau.de/nachrichten/transport-logistik/klimaschutzbericht-co2-emissionen-im-verkehr-gestiegen-2972191> (abgerufen am 31. Mai 2023)

VDI (2016): Kurzanalyse Nr. 3: Kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe im Fahrzeugbau – Ressourceneffizienz und Technologien; 3. Auflage.

Vogel, J.; Krüger, F.; Fabian, M. (2020): Chemisches Recycling. Umweltbundesamt. Hintergrund//Juli 2020. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2020-07-17_hgp_chemisches-recycling_online.pdf (abgerufen am 31. Mai 2023)

Volkswagen AG (2019): Nachhaltigkeitsbericht 2018. <https://www.volkswagen-group.com/de/publikationen/unternehmensberichte/nachhaltigkeitsbericht-2018-1980/download?disposition=attachment> (abgerufen am 31. Mai 2023)

Wagner, C. (2021): Weltexporte. Made in Germany – die meist exportierten Güter Deutschlands. <https://www.weltexporte.de/exportprodukte-deutschland/> (abgerufen am 31. Mai 2023)

Westfälische Wilhelms-Universität Münster (2018): Löwenzahn-Kautschuk auf dem Weg zur Marktreife: Reifenhersteller Continental eröffnet „Taraxagum Lab Anklam“. <https://www.uni-muenster.de/news/view.php?cmdid=9971> (abgerufen am 31. Mai 2023)

Wilts, H. (2018): Was passiert mit unserem Müll? In: APuz 49-50/2018 Eine Zeitschrift der Bundeszentrale für politische Bildung. ISSN 0479-611 X. S. 9–16.

Wuppertal Institut (2020): CRM ELV. Bridging ELV and WEEE Treatment for the Recovery of Critical Metals. <https://wupperinst.org/en/p/wi/p/s/pd/1966> (abgerufen am 31. Mai 2023)

Wuppertal Institut (o. J.): DownMet. Ressourceneffizienzsteigerung in der Metallindustrie – Substitution von Primärrohstoffen durch Verminderung des Downcyclings. <https://wupperinst.org/p/wi/p/s/pd/873> (abgerufen am 31. Mai 2023)

World Economic Forum and SYSTEMIQ (2021): Paving the Way: EU Policy Action for Automotive Circularity. http://www3.weforum.org/docs/WEF_Circular_Cars_Initiative_Paving_the_Way_2021.pdf (abgerufen am 31. Mai 2023)

Stiftung Arbeit und Umwelt der IGBCE

Inselstraße 6
10179 Berlin
Telefon +49 30 2787 1325

Königsworther Platz 6
30167 Hannover
Telefon +49 511 7631 472

E-Mail: arbeit-umwelt@igbce.de
Internet: www.arbeit-umwelt.de

