

Abschlussbericht BWPLUS

Kreislaufgerechtes Design – Schaffung von Informationsschnittstellen zwischen Fahrzeugentwicklung und Recyclingindustrie zur Identifizierung von Anforderungen, Barrieren und Chancen einer regionalen Vernetzung

von

Mohamad Abdallah, Stephan Altvater, Dr.-Ing. Elmar Beeh, Janis Ganzenmüller

Abteilung: Werkstoff- und Verfahrensanwendungen Gesamtfahrzeug
Institut für Fahrzeugkonzepte
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.

Förderkennzeichen: BWCE24106

Laufzeit: 01.01.24 - 30.09.24

Finanziert aus Landesmitteln, die der Landtag Baden-Württemberg beschlossen hat.

September 2024



Baden-Württemberg
Ministerium für Umwelt, Klima
und Energiewirtschaft

Kurzfassung

Kreislaufwirtschaft und das Design für Circularity-Methoden gewinnen angesichts globaler Veränderungen zunehmend an Bedeutung. Traditionell lag der Fokus bei der Produktentwicklung auf der Effizienzsteigerung während der Nutzungsphase, während Verwertungsperspektiven am Lebensende oft vernachlässigt wurden. Dies führte dazu, dass viele Recyclingmaterialien, trotz eines steigenden Schrottaufkommens, nicht optimal genutzt werden können, da Demontage, Sortierung und Verwertung technisch kompliziert und kostspielig sind. Unsere Ergebnisse basieren auf Besuchen bei Recyclingunternehmen, Interviews mit Produktentwicklern sowie einer umfassenden Umfrage, die beide Gruppen einbezog.

Ziel dieser Machbarkeitsstudie ist es, mit in Baden-Württemberg ansässigen Entsorgern und Vertretern der Automobilindustrie ein Zielbild eines aus Entsorgersicht günstigen kreislaufgerechten Designs zu entwickeln und dabei die bestehenden Barrieren zu identifizieren. Auf Grundlage gemeinsam analysierter Zerlegestudien von Automobilkomponenten wird das Potenzial einer bislang wenig etablierten Verknüpfung von Entsorgerwissen und Produktentwicklung untersucht.

Um die festgestellten Herausforderungen zu bewältigen, ist ein hybrider Ansatz erforderlich. Dieser sollte regionale Materialströme priorisieren, wenn genügend Ressourcen zur Verfügung stehen, und überregionale Verbindungen herstellen, wenn dies nicht der Fall ist, da viele Unternehmen über die Grenzen von Baden-Württemberg hinaus tätig sind. Zur Umsetzung dieses Ansatzes wird ein Konzept für eine digitale Matching-Plattform sowie andere Pfade vorgeschlagen, dass weitere Transparenz schafft und die Kreislaufwirtschaft vorantreibt, um die Wettbewerbsfähigkeit von Baden-Württemberg auf dem globalen Markt zu sichern.

Inhalt

Kurzfassung.....	iii
Inhalt.....	iv
Abbildungsverzeichnis.....	vii
Abkürzungsverzeichnis.....	viii
1 Einleitung.....	1
1.1 Motivation.....	1
1.2 Zielsetzung.....	1
1.3 Vorgehen.....	2
2 Stand der Technik.....	4
2.1 Nachhaltige Designs und Design for Circularity.....	4
2.2 Rohstoffrecycling und Recyclingmarkt.....	5
2.3 Prozesskette.....	6
3 Zerlegestudie.....	8
3.1 Analysierte Komponenten.....	8
3.2 Fallbeispiel Anlasser.....	8
3.3 Fallbeispiel Lenkrad.....	9
3.4 Bewertung.....	10
4 Umfrage.....	11
4.1 Umfrageergebnisse zu regionaler Vernetzung.....	11
4.2 Umfrageergebnisse zur Kreislaufwirtschaft.....	12
4.3 Zusammenfassung.....	12
5 Barrieren und mögliche Maßnahmen.....	14
5.1 Identifizierung von Barrieren.....	14
5.2 Maßnahmen.....	14
6 Zusammenfassung.....	17
7 Verwertung.....	18
8 Ausblick.....	20
Literaturverzeichnis.....	21
Anhang A1: Bilder.....	A
A1.1: Die Prozesskette des Fahrzeugrecyclings.....	A
A1.2: Tabellarische Darstellung der Vermögensströme innerhalb einer stilisierten Autorecycling-Infrastruktur [13].....	B
A1.3: Ein Konzept für eine digitale Matching-Plattform für effizientes und optimiertes Recyclingmaterial und -routen.....	B
A1.4: Analysierte Komponenten im Rahmen der Zerlegestudie.....	C

A1.5: Zerlegestudie Lenkrad BMW	D
A1.6: Zerlegestudie Lenkrad Opel	E
A1.7: Zerlegestudie Lenkrad Kia	F
A1.8: Zerlegestudie Sitz Tesla	G
A1.9: Zerlegestudie Sitz Audi	H
A1.10: Zerlegestudie Sitz Mercedes	I
A1.11: Zerlegestudie Anlasser Bosch	J
A1.12: Zerlegestudie Anlasser ATL Autotechnik	K
A1.13: Zerlegestudie Anlasser Alanko	L
A1.14: Zerlegestudie Scheinwerfer BMW	M
A1.15: Zerlegestudie Scheinwerfer Seat	N
A1.16: Zerlegestudie Scheinwerfer Dacia	O
A1.17: Zerlegestudie Außenspiegel BMW	P
A1.18: Zerlegestudie Außenspiegel VW	Q
A1.19: Zerlegestudie Außenspiegel Dacia	R
A1.20: Zerlegestudie Bewertungstabelle	S
Anhang A2: Umfrage	T
A2.1: <i>“Wie viele Informationen haben Sie über die Entsorgungspfade Ihrer Produkte an deren Lebensende?“ (PE)</i>	T
A2.2: <i>“Wäre es für Sie in Bezug auf die Gestaltung Ihrer Produkte nützlich, mehr Informationen über die Recyclingprozesse am Lebensende zu erlangen?“ (PE)</i>	T
A2.3: <i>“Halten Sie eine regionale Vernetzung von Entsorgern und der Automobilindustrie inkl. Zulieferer in Baden-Württemberg für sinnvoll/geeignet, um eine verbesserte Recyclingfähigkeit von Produkten zu erzielen?“ (PE + VR)</i>	U
A2.4: <i>„Wo sehen Sie Barrieren für eine regionale Vernetzung von Entsorgern und Produktentwicklern?“(PE + VR)</i>	U
A2.5: <i>„Welche Vorteile/Chancen sehen Sie durch eine regionale Vernetzung von Entsorgern und Produktentwicklern?“ (PE +VR)</i>	V
A2.6: <i>„Bestehen in Ihrem Unternehmen schon Kontakte zu Recyclingfirmen, die Ihnen relevante Informationen über die Verwertung Ihrer Produkte zur Verfügung stellen könnten?“ (PE)</i>	V
A2.7: <i>„Besteht in Ihrem Netzwerk die Möglichkeit, Hinweise und Empfehlungen an Produktentwickler zu geben?“ (VR)</i>	W
A2.8: <i>„Für wie wichtig halten Sie die folgenden Punkte an eine regionale Vernetzung von Entsorgern und Produktentwicklern?“ (PE + VR)</i>	W
A2.9: <i>„Hätten Sie weitere Anforderungen/Wünsche an eine regionale Vernetzung von Entsorgern und Produktentwicklern?“</i>	X
A2.10: <i>„Welche Maßnahmen werden im Rahmen der Kreislaufwirtschaftsstrategie in Ihrem Unternehmen bereits umgesetzt?“</i>	X

- A2.11: „Welche Maßnahmen sehen Sie als besonders wichtig an, um eine funktionierende Kreislaufwirtschaftsstrategie im Unternehmen zu implementieren?“ (PE + VR) X
- A2.12: „Nach welchen Kriterien im Produktdesign werden in Ihrem Unternehmen/Arbeitsbereich Materialien ausgewählt?“ (PE) Y
- A2.13: „Nach welchen Kriterien werden für Ihre Produkte Fügetechniken ausgewählt?“ (PE) Y
- A2.14: „Wo sehen Sie aktuell noch Hindernisse für die Rückgewinnung von Kunststoff aus Metallteilen und umgekehrt?“ (VR) Z
- A2.15: „Wie wird bei Ihnen der Grenzwert zur Vermeidung unerwünschter Verunreinigungen festgelegt?“ (VR) Z
- A2.16. „Haben Sie Ideen/Hinweise/Anmerkungen bezüglich einer regionalen Vernetzung von Entsorgern und Produktentwicklern?“ Z

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Prozesskette des Fahrzeugrecyclings	6
Abbildung 2.2 Tabellarische Darstellung der Vermögensströme innerhalb einer stilisierten Autorecycling-Infrastruktur [13].....	7
Abbildung 3.1 Analysierte Komponenten von unterschiedlichen Fahrzeugherstellern im Rahmen der Zerlegestudie	8
Abbildung 3.2 Fallbeispiel Anlasser	8
Abbildung 3.3 Fallbeispiel Lenkrad	9
Abbildung 3.4 Detailaufnahme umschäumte Struktur aus Magnesium	9
Abbildung 3.5 Detailaufnahme eingegossene Elemente aus Stahl	9
Abbildung 3.6 Detailaufnahme Kupferinserts.....	10
Abbildung 4 - Ein Konzept für eine digitale Matching-Plattform für effizientes und optimiertes Recyclingmaterial und -routen.....	15

Abkürzungsverzeichnis

CRMA	<i>Critical Raw Material Act</i>
DfC	<i>Design for Circularity</i>
ELVs	<i>End-of-life vehicles</i>
LCA	<i>Life Cycle Assessment</i>
LIBS	<i>Laser-induced breakdown spectroscopy</i>
SSbD	<i>Safe and Sustainable by Design</i>
VR	<i>Verwerter und Recycler</i>
PE	<i>Produktentwickler</i>

1 Einleitung

1.1 Motivation

Angesichts der zunehmenden europäischen Bestrebungen zur Förderung von Nachhaltigkeit und Ressourceneffizienz, wie dem EU-Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft, der EcoDesign-Richtlinie und dem Konzept der Sicheren und Nachhaltigen Gestaltung (SSbD), gewinnt die Kreislaufwirtschaft in der Automobilindustrie zunehmend an Bedeutung. Zusätzlich fordert das neue Europäische Gesetz zu kritischen Rohstoffen (CRMA) eine Erhöhung des Anteils an Recyclingmaterialien sowie effizientere Verfahren zur Rückgewinnung von Ressourcen am Ende des Produktlebenszyklus.

Bisher lag der Schwerpunkt der Automobilindustrie vor allem auf der Produkteffizienz durch Gewichtsreduktion, während die Recyclingfähigkeit nach der Nutzungsphase oft vernachlässigt wurde. Dadurch wird nur etwa 30 % der verwendeten Materialien tatsächlich recycelt, während 50 % der zurückgewonnenen Materialien von minderer Qualität sind und nicht wiederverwertet werden können [1,2]. Dies ist vor allem auf komplexe Demontage- und Sortierprozesse sowie auf das unzureichende Wissen der Entwickler über Recyclingverfahren zurückzuführen.

Es wird zunehmend deutlich, dass die Verbesserung der Kreislauffähigkeit von Produkten eine entscheidende Rolle für die Wettbewerbsfähigkeit und die Nachhaltigkeit in der Automobilindustrie spielt. Eine stärkere Vernetzung von Entwicklern und Entsorgungsunternehmen sowie eine Berücksichtigung der Recyclingfähigkeit bereits im

Designprozess sind erforderlich, um den steigenden Anforderungen an die Ressourceneffizienz gerecht zu werden. Diese Entwicklungen unterstreichen die Notwendigkeit, vorhandene Barrieren abzubauen und den Austausch zwischen allen Beteiligten zu fördern, um den Übergang zur Kreislaufwirtschaft zu unterstützen. Dies ist besonders relevant in einer Zeit, in der Themen wie Ressourcensouveränität, regionale Verfügbarkeit und Stabilität immer wichtiger werden, um Wettbewerbsvorteile in der Kreislaufwirtschaft zu sichern.

1.2 Zielsetzung

Ein effektiver, aber bislang vernachlässigter Schlüssel für eine verbesserte Kreislaufwirtschaft besteht in der recyclinggerechten, reparaturfreundlichen und ressourcensparenden Produktentwicklung. Dem Entwickler stehen aber häufig nur sehr oberflächliche Informationen zur Verfügung, durch welche Merkmale ein Produkt besser oder schlechter recycelt werden kann. So kann eine grundsätzlich gut rezyklierbare Aluminiumlegierung durch ein Stahlfügeelement oder eine ungeeignete Beschichtung entwertet werden und landet dadurch in einer schlechteren Schrottkategorie. Dies ist weder im Interesse der Entsorger noch des Entwicklers, es fehlt aber eine Schnittstelle, um voneinander zu lernen.

Derartige Schnittstellen profitieren stark von einem regionalen Ansatz, da die Vernetzung unterschiedlicher Kompetenzen unkompliziert und mit überschaubarem Aufwand möglich sein muss. Daher zielt diese Machbarkeits- und Potentialanalyse auf eine regionale Vernetzung von Entsorgern und Automobilindustrie in Baden-Württemberg. Erkenntnisse können

zukünftig aber auch überregional dazu dienen, ein kreislaufgerechteres Design zu etablieren, bei welchem die hiesige Industrie dann aber eine Führungsrolle einnimmt.

Der Ansatz, ein Produkt schon in der Entwicklung von seinem Lebensende her zu denken, stand bislang in den Lastenheften oder Anforderungsdefinitionen nicht im Vordergrund. In der automobilen Entwicklungsingenieursausbildung werden Aspekte der Verwertung höchstens oberflächlich behandelt, in der täglichen Berufspraxis gibt es jedoch keine Schnittstellen. Betriebe der Automobilindustrie arbeiten zwar im Bereich der Verwertung von Produktionsabfällen mit den Entsorgungsbetrieben zusammen, eine Zusammenarbeit mit der Produktentwicklung ist in der Regel nicht etabliert.

Ziel dieser Potentialanalyse ist es daher, eine Schnittstelle zu schaffen und dabei zu bewerten, welche Verbesserungspotentiale im Produktdesign ermöglicht werden können, wenn der Wissensaustausch von Entsorgern und Entwicklung etabliert und organisiert wird. Die Idee ist, eine Diskussions-basis zu schaffen, indem anhand von Zerlegestudien automobiler Komponenten Gespräche mit größeren regionalen Entsorgungsbetrieben geführt werden, um Schwachstellen im Design im Hinblick auf ein späteres Recycling zu identifizieren. Dabei sollen Aspekte wie die Materialzusammensetzung, eingesetzte Fügetechniken und Beschichtungen von Entsorgern bewertet werden.

1.3 Vorgehen

Für die erfolgreiche Umsetzung dieses Projekts ist die enge Zusammenarbeit mit unseren Industriepartnern von entscheidender Bedeutung. Diese Partnerschaften ermöglichen es uns, die erforderlichen Aufgaben effektiv durchzuführen und sowohl Fachwissen als auch praktische Erfahrungen einzubringen.

Zu Beginn erfolgt die Auswahl und Beschaffung geeigneter Automobilkomponenten. In Kooperation mit unseren Industriepartnern werden spezifische Kriterien entwickelt, um Komponenten mit unterschiedlichen Materialzusammensetzungen und Fügetechniken zu identifizieren. Diese Komponenten werden dann entweder direkt von den Partnern bereitgestellt oder über den Gebrauchteilemarkt beschafft.

Nach der Beschaffung der Komponenten konzentrieren wir uns auf die Zerlegestudien. In unserer institutseigenen Werkstatt werden die Komponenten systematisch demontiert. Hierbei erfassen wir die Zeit, die für die Demontage benötigt wird, und bewerten qualitativ die Zerlegbarkeit. Die einzelnen Schritte werden detailliert dokumentiert und bildlich festgehalten. Gleichzeitig werden die optimalen Verfahren für die Trennung und Sortierung der Materialien in Abstimmung mit den Entsorgungsunternehmen ermittelt.

Im Anschluss erfolgt die Analyse der aktuellen Strukturbaueisen. Durch Gespräche mit verschiedenen Entsorgungsunternehmen werden die Herausforderungen und Schwächen in der Demontage und Verwertung der Komponenten identifiziert. Diese Gespräche liefern wichtige Erkenntnisse zur Effizienz der bestehenden Recyclingprozesse und

ermöglichen es uns, mögliche Verbesserungen zu erkennen.

Zusätzlich wird eine umfassende Umfrage konzipiert und durchgeführt. Diese Umfrage zielt darauf ab, strategische und wirtschaftliche Aspekte der Kreislaufwirtschaft zu verstehen, die Interessen der beteiligten Akteure zu erfassen und Barrieren bei der Etablierung einer Kreislaufwirtschaft zu identifizieren. Die Umfrage richtet sich an Entwickler aus der Automobilindustrie sowie an Entsorgungsunternehmen und hilft dabei, eine breite Datenbasis zu schaffen und weitere Erkenntnisse zu gewinnen.

Abschließend werden die identifizierten Problemfelder systematisch analysiert. Die Ergebnisse der Umfrage und der bisherigen Analysen fließen in die Entwicklung von Handlungsoptionen ein, die eine nachhaltigere Produktentwicklung fördern sollen. Langfristig streben wir an, Baden-Württemberg als Vorreiter im Bereich des kreislaufgerechten Designs in der Automobilindustrie zu positionieren, wobei eine verbesserte Vernetzung zwischen Fahrzeugentwicklung und Entsorgungsbetrieben von entscheidender Bedeutung ist.

2 Stand der Technik

2.1 Nachhaltige Designs und Design for Circularity

Während im Konsumentenbereich nachhaltiges Design von Produkten schon länger eine Rolle spielt, was sich beispielsweise schon in älteren Kampagnen wie „Jute statt Plastik“ widerspiegelt [3], waren in technischen Bereichen, wie dem Automobilbau, länger andere Themenschwerpunkte zur Ressourcenschonung, z. B. durch intensiven Leichtbau relevant [4]. Im Zuge der Elektrifizierung von Fahrzeugen verschieben sich bei steigendem Einsatz grünen Stroms die Emissionsanteile eines Fahrzeugs von der Nutzungs- in die Produktionsphase, so dass der CO₂-Fußabdruck der eingesetzten Materialien mehr und mehr in den Fokus rückt [5, 6]. In der praktischen Umsetzung werden Materiallösungen mit Hilfe standardisierter durchgeführter Life Cycle Assessments (LCA) bezüglich ihrer CO₂-Emissionen pro kg Material verglichen [7].

Entwicklungsingenieure treffen im Konstruktionsprozess von Komponenten und Baugruppen vielfältige, fachliche Entscheidungen, welche eine breite Expertise erfordern. Neben dem Verständnis der grundlegenden Mechanik sowie der Konstruktions- und Simulationswerkzeuge, wird ein gutes Wissen über Werkstoffe und Fertigungsverfahren benötigt. Entscheidungen für eine technische Lösung müssen aber auch wirtschaftlichen Gesichtspunkten genügen. Grundlegende Entscheidungen für ein infrage kommendes Materialsystem werden

daher in einer frühen Phase der Entwicklung unter Abwägung technischer und wirtschaftlicher Aspekte getroffen. So ist beispielsweise im Entwicklungsprozess meist sehr früh festgelegt, ob Stahl, Aluminium oder Faserverbundbauweisen zum Einsatz kommen sollen. Mit Festlegung der grundlegenden Werkstoffe müssen auch Fügeverfahren ausgewählt werden, die eine sichere Verbindung der Bauteile mit ihrer Umgebung ermöglichen. In diesen Prozessschritten werden erste wichtige Festlegungen definiert, welche die Recyclingfähigkeit beeinflussen. Eine detaillierte Auswahl einer speziellen Legierung erfolgt in der Regel erst später im Entwicklungsprozess, wobei Materialeigenschaften, Verfügbarkeit, Lieferanten und Preise eine Rolle spielen.

Eine Bewertung von Verwertungsoptionen am Lebensende des Bauteils findet aktuell mangels Transparenz über die dortigen Prozesse weitgehend nicht statt. Dies zeigt sich beispielsweise in den Ergebnissen der ersten Gesprächsrunden der 2021 gegründeten Dialogplattform Recyclingrohstoffe, bei welcher Barrieren für eine bessere Verwertung von Werkstoffen diskutiert wurden [8]. Die EU-Ökodesignrichtlinie [nd08] eröffnet zwar seit 2009 die zukünftige Möglichkeit, Recyclingfähigkeit von Produkten als Kriterium einzuführen, die aktuellsten Arbeitsprogramme haben aber noch andere Schwerpunkte, wie Mindestanforderungen an die Reparierbarkeit [9]. Im Fokus stehen jedoch aktuell Elektro- und Haushaltsgeräte.

Die gegenwärtige Situation besteht darin, dass Informationen über die späteren Verwertungsoptionen von Bauteilen und Komponenten den

Ingenieuren im Entwicklungsprozess gemeinhin nicht zur Verfügung stehen. Dieser Schwachpunkt wird in heutigen Entwicklungen dadurch kaschiert, dass bei der Werkstoffwahl Zielwerte für Recyclingquoten, z. B. bei Aluminiumgusslegierungen, vorgegeben werden. Nachhaltiges Design beschränkt sich, wie oben erläutert darauf, einen Werkstoff mit niedrigerem CO₂-Fußabdruck auszuwählen.

2.2 Rohstoffrecycling und Recyclingmarkt

Die Altfahrzeug-Verordnung [10] fordert in der aktuellen Fassung für Fahrzeuge eine Verwertungsquote von 95% und eine Recyclingquote von 85%. Die Fahrzeugindustrie adressiert diese Forderungen durch Kennzeichnungen von Werkstoffen und durch das Konzept, dass metallische Werkstoffe grundsätzlich auch verunreinigt weiterverarbeitet werden können, wenngleich dadurch die Werkstoffeigenschaften des Recyclingmaterials verschlechtert werden. Ein Schwachpunkt des heutigen Systems ist, dass die geforderte Quote lediglich einen Nachweis der grundlegenden Rezyklierbarkeit darstellt. Es gibt also Verfahren und Konzepte für das Recycling von 85% der eingesetzten Materialien, jedoch wird damit nicht beantwortet, ob die sortenreine Trennung der Bauteile wirtschaftlich attraktiv ist oder ob es beim Recycling zu Verschlechterungen der Werkstoffeigenschaften kommt. An dieser Stelle bedarf es einer Verknüpfung zwischen Produktdesign und Verwertung, um das Recycling praktisch besser umsetzbar zu machen. Diese erforderliche Schnittstelle adressieren wir in dieser Kurzstudie durch Einbindung der großen Automobilzulieferer, welche Bauteile

oder Schrotte aus ihrem Produktportfolio für die geplanten Zerlegestudien bereitstellen.

Es gibt drei grundlegende Abfallkategorien. End-of-Life-Abfälle bestehen aus funktionsuntüchtigen Produkten, die dezentral anfallen. End-of-Use-Abfälle, bestehen aus noch funktionierenden Produkten, die beispielsweise veraltet sind und die in der Regel in ähnlichen Verwertungsrouten recycelt werden, wie die End-of-Life-Abfälle. Die dritte Kategorie sind die Produktionsabfälle. Sie fallen nicht dezentral, sondern lokal am Produktionsstandort an (z.B. Fehlchargen, Stanzabfälle, Abwässer) und können sortenrein gesammelt werden. Zudem unterlagen sie keinem Verschleiß durch die Nutzung. Sofern möglich, werden Produktionsabfälle direkt am Standort recycelt. Zum Teil gibt es bei Produktionsabfällen auch Hersteller-Kunden-Recyclingkreisläufe, wenn beispielsweise ein Stahlwerk bei Lieferung der Walzbleche an den Kunden zugleich dort anfallende Stanzabfälle abholt.

Produktionsabfälle lassen sich am einfachsten recyceln (innerhalb des Produktionsprozesses), und hierbei handelt es sich meist auch tatsächlich um ein Recycling. Der Großteil aller Abfälle besteht indes aus Abfallmischungen verschiedener Qualitäten, die eben nicht zur Produktion jener Produkte eingesetzt werden, aus denen sie ursprünglich einmal entstanden sind. Stattdessen entstehen andere Folgeprodukte, mit niedrigeren oder ähnlichen Qualitätsanforderungen (Downcycling), die bislang gar nicht in Produktdesignbewertungen berücksichtigt werden (können). Dies ist beispielsweise bei Aluminiumgusslegierungen der Fall. Dort werden heterogene Aluminiummischschrotte durch die

Herausforderung, dass fortschrittliche Technologien wie die Laser-induzierte Breakdown-Spektroskopie (LIBS) zwar effizient Materialien sortieren können, aber oft mit hohen Kosten verbunden sind. Damit diese Technologien wirtschaftlich tragfähig sind, benötigen Verwerter einen kontinuierlichen Materialfluss und ausreichende Mengen, um die Investitionen zu rechtfertigen. Für bestimmte Materialien wie Stahl oder Aluminium mag dies aufgrund ihrer weiten Verbreitung in der Automobilindustrie möglich sein, aber für andere, seltener verwendete Materialien kann es schwierig sein, diese Voraussetzungen zu erfüllen. Dadurch entsteht ein weiteres wirtschaftliches Risiko, da Verwerter teure Technologien nicht einsetzen werden, wenn diese aufgrund der geringen Materialmenge nicht rentabel arbeiten [12]

Actor	Source of Income/Recipient of Expense									
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
A Last User	-V	+/-								
B Dismantler	+/+	-P	+		?	+	+	+		-
C Shredder		-	-P	+	?		+			-
D Non-Ferrous Separator			-	-P	?			+		-
E New Processors		?	?	?	-P	+?	+?	+?	+	-
F Used Parts Market		-			-?	+V				
G Ferrous Scrap Market		-	-		-?	+V				
H Nonferrous Scrap Market		-	-	-	-?			+V		
I New Scrap Market					-				+V	
J Landfill		+	+	+	+					-P

Abbildung 2.2 Tabellarische Darstellung der Vermögensströme innerhalb einer stilisierten Autorecycling-Infrastruktur [13]

Ein zentraler Aspekt, der oft unterschätzt wird, ist die Vernetzung der verschiedenen Akteure entlang der Recyclingkette. Jeder Schritt beeinflusst die nachfolgenden Akteure. Der Erfolg der Demontage bestimmt die Effizienz des Schredderprozesses und beeinflusst wiederum, wie Materialien für die Sortierung vorbereitet werden. Fehlende Kooperation und mangelnde Abstimmung führen hier zu ineffizienten Prozessen, was wiederum die wirtschaftliche Rentabilität reduziert. Durch eine bessere Vernetzung,

insbesondere auf regionaler Ebene, könnten die Transportkosten reduziert und die Effizienz der Materialströme gesteigert werden. Überregionale Lösungen erhöhen oft die Transportkosten und belasten den Recyclingprozess mit zusätzlichen logistischen Herausforderungen. Eine regionale Optimierung bietet hingegen das Potenzial, sowohl den ökologischen Fußabdruck zu minimieren als auch den wirtschaftlichen Nutzen für alle Beteiligten zu maximieren [14].

Darüber hinaus spielt die Materialsortierung eine entscheidende Rolle, um hochwertige Sekundärrohstoffe zu gewinnen, die auf verschiedenen Märkten weiterverwertet werden können. Insbesondere Metalle, sowohl ferromagnetische als auch nicht-ferromagnetische, stellen einen bedeutenden wirtschaftlichen Wert dar und sind zentrale Güter für die Recyclingwirtschaft. Die Herausforderung liegt darin, einen kosteneffizienten Weg zu finden, um diese Materialien in hoher Qualität und ausreichender Menge aufzubereiten. Gleichzeitig kann der Markt für neue Prozessoren und der Gebrauchtteilemarkt durch gut optimierte Rückgewinnungsstrategien weiterentwickelt werden, was zusätzliche Einkommensquellen für die beteiligten Akteure erschließt [12].

3 Zerlegestudie

3.1 Analyisierte Komponenten

Im Rahmen der Zerlegestudie wurden diverse Komponenten aus Altfahrzeugen am Gebrauchtteilemarkt beschafft, systematisch von Hand zerlegt und in Bezug auf zuvor festgelegten Bewertungskriterien analysiert.

Um ein möglichst breites Bild über die Fahrzeughersteller, Fahrzeugklassen, eingesetzten Materialien und Fügeverfahren hinweg zu erhalten, wurden je Komponente (Lenkrad, Sitz, Anlasser, Scheinwerfer und Außenspiegel) drei Bauteile untersucht. Eine Übersicht zu den betrachteten Komponenten ist in Abbildung 3.1 bzw. im Anhang A1.4 zu sehen.



Abbildung 3.1 Analyisierte Komponenten von unterschiedlichen Fahrzeugherstellern im Rahmen der Zerlegestudie

Die im Folgenden näher erläuterten Fallbeispiele sind exemplarisch und lassen sich auch auf die Komponenten der anderen Fahrzeughersteller übertragen.

3.2 Fallbeispiel Anlasser

Die Aufbereitung von Anlassern ist bereits seit Jahren ein etablierter Prozess in der Automobilbranche.

Dies widerspiegelt sich maßgeblich an den eingesetzten Einzelteilen aus Materialien mit hoher Verschleißfestigkeit und

Korrosionsbeständigkeit, sowie am konstruktiven Aufbau.

Durch den typischerweise modularen Aufbau mit geringer Komplexität und adäquaten Fügeverfahren (Zylinderstifte und Schrauben), sind Anlasser grundsätzlich einfach und schnell zerlegbar. Lediglich der Rotor und Magnetschalter konnten, im Rahmen der Untersuchungen, ohne Schreddern nicht weiter bis zur vollständigen sortenreinen Materialtrennung zerlegt werden. Abbildung 3.2 bzw. Anhang A1.12 zeigt exemplarisch den zerlegten Anlasser von ATL Autotechnik.



Abbildung 3.2 Fallbeispiel Anlasser

Für das Zerlegen wurden 20 min benötigt. Die eingesetzten Hilfsmittel waren dabei ein Schraubendreher, eine Zange und ein Akkuschrauber mit Metallbohrer.

Der Aufbau von Anlassern unterschiedlicher Hersteller ist grundsätzlich ähnlich.

Eine Automatisierung der Demontageschritte ist grundsätzlich denkbar, aber vermutlich aufgrund der vielfältigen Bauweisen und Typen nicht rentabel.

Dennoch ist das Remanufacturing für die Aufarbeitung von Anlassern eine zentrale Maßnahme zur Steigerung der Ressourceneffizienz. Die Vorteile sind:

- Etablierter standardisierter Prozess
- Verlängerung der Nutzungsdauer
- Nachhaltige Option zur Kreislaufschließung von Materialströmen

- Geringerer Material- & Energieeinsatz (Vergl. Neuteileproduktion)
- Ressourceneffiziente Alternative zum Recycling
- Fördert Unabhängigkeit von kritischen Rohstoffen

Das Remanufacturing von Fahrzeugkomponenten kann im Vergleich zur Neuproduktion bis zu 88 % Material einsparen, die CO₂-Emissionen um bis zu 53 % senken und den Energieverbrauch um mehr als die Hälfte reduzieren [15].

Um sicherzustellen, dass die Alteile umweltgerecht entsorgt und dem Kreislauf zurückgeführt werden, haben viele Werkstätten Vereinbarungen mit Recyclingunternehmen.

3.3 Fallbeispiel Lenkrad

Das Zerlegen der Lenkräder ist grundsätzlich sehr komplex und nur mit sehr hohem Aufwand möglich. Abbildung 3.3 bzw. Anhang A1.5 zeigt exemplarisch das zerlegte Lenkrad von BMW.

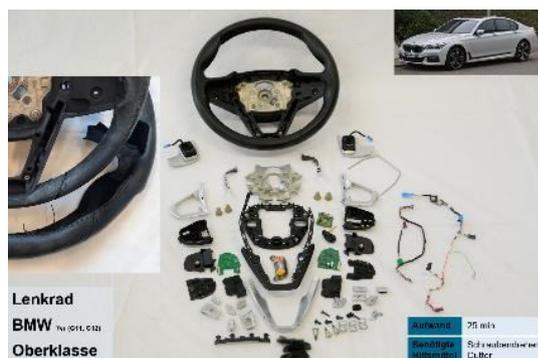


Abbildung 3.3 Fallbeispiel Lenkrad

Alle Bauteile aus unterschiedlichen Kunststoffen, Kupferkabel sowie elektronische Elemente ließen sich mit einem Schraubendreher vollständig vom Lenkradkranz demontieren. Nachdem im weiteren Verlauf die Verbindungsnahte an der Lederummantelung mit einem Cutter durchtrennt wurden, konnte die

verklebte Ummantelung, ohne vorheriger thermischer Einwirkung, von Hand abgezogen werden.

Eine weitere Demontage des Lenkradkranz (umschäumt) ist nur schwer und mit sehr hohem Zeitaufwand möglich.

Die mit Kunststoff umschäumte Struktur aus Magnesium, siehe Abbildung 3.4, verhindert außerdem eine sortenreine Trennung der Materialien.



Abbildung 3.4 Detailaufnahme umschäumte Struktur aus Magnesium

Zudem erschweren Kupfer-/Messinginserts und eingegossene/ gepresste Stahlinserts in der Magnesiumstruktur, siehe Abbildung 3.5 und 3.6, die sortenreine Trennung der Materialien und damit das Recycling.

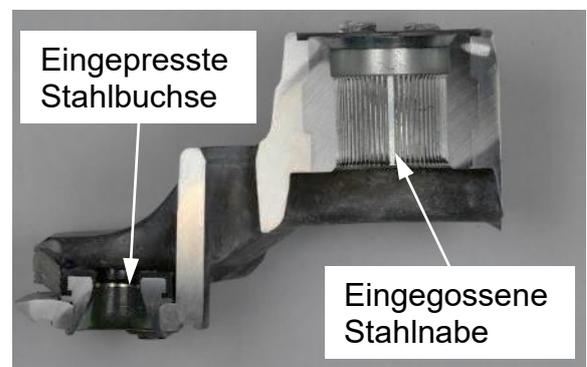


Abbildung 3.5 Detailaufnahme eingegossene Elemente aus Stahl

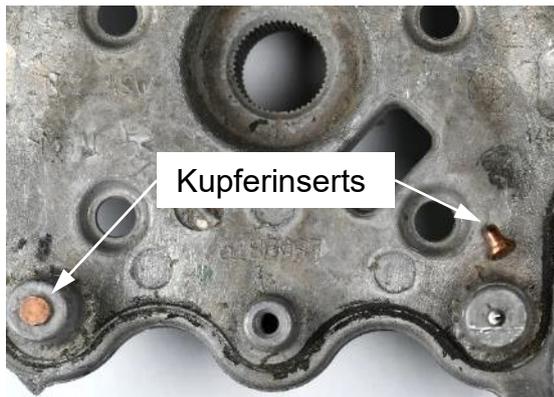


Abbildung 3.6 Detailaufnahme Kupferinserts

3.4 Bewertung

Eine Gesamtübersicht mit den analysierten Komponenten und Bewertungskriterien der Zerlegestudie ist im Anhang A1.20 beigelegt.

Als Bewertungskriterien wurden das Design for Recycling, die sortenreine Trennbarkeit, die Recyclierbarkeit, der zeitliche Aufwand und die Automatisierbarkeit mit jeweils drei Stufen festgelegt. Außerdem wurden die benötigten Hilfsmittel/Werkzeuge dokumentiert.

Als Fazit der Zerlegestudie lässt sich festhalten, dass recyclinggerechtes Design nur selten berücksichtigt wird. Insbesondere umschäumte/umspritzte, eingepresste/eingegossene Hilfsfügeelemente und verklebte Bauteile verhindern eine sortenreine Materialtrennung und erschweren somit das Recycling.

Eine vollständige Zerlegung der betrachteten Komponenten ist grundsätzlich möglich, aber mit hohem Zeit- und Personalaufwand verbunden ist.

Eine Automatisierung der einzelnen, mitunter sehr umfangreichen, Demontageschritte erscheint aufgrund der vielfältigen und teilweise komplexen Bauweisen nicht rentabel.

4 Umfrage

Um eine Empfehlung hinsichtlich einer regionalen Vernetzung von Produktentwickler und Verwerter abgeben zu können, war es notwendig einen Eindruck von der aktuellen Situation in der Wirtschaft zu erhalten. Daher wurde eine Umfrage erarbeitet, welche für beide Parteien ausgewählten Fragen zu Themen wie DfC, regionaler Vernetzung und bereits erfolgter Maßnahmen für mehr Nachhaltigkeit enthielt. Die Antworten der befragten Unternehmen wurden anonym erfasst und ausgewertet.

Im Folgenden werden nun zwei Themenbereiche aufgearbeitet, welche aus der Umfrage hervorgegangen sind. Der erste Themenbereich beschäftigt sich mit der regionalen Vernetzung von Produktentwicklern und Verwertern. Im zweiten Themenbereich wird die Kreislaufwirtschaft betrachtet. Im Rahmen der Umfragen haben sieben Produktentwickler und vier Recycler ihre Antworten abgegeben. Die statistische Auswertung der Umfrage bezieht sich daher auf eine Anzahl von zehn befragten Unternehmen.

4.1 Umfrageergebnisse zu regionaler Vernetzung

Die erste Frage, welche an beide Parteien gestellt wurde, lautete: "Halten Sie eine regionale Vernetzung von Entsorgern und der Automobilindustrie inkl. Zulieferer in Baden-Württemberg für sinnvoll/geeignet, um eine verbesserte Recyclingfähigkeit von Produkten zu erzielen?"

Als Antwort gaben 75 % der Verwerter und Recycler (VR) und 33 % der Produktentwickler (PE) an, dass sie es für sinnvoll oder sehr sinnvoll halten eine solche Vernetzung voran zu treiben.

Als nächstes wurden gefragt, worin Hürden für eine regionale Vernetzung

gesehen werden. Hierbei gaben über 70 % beider Parteien an, dass überregionale Geschäftsbeziehungen aktuell überwiegen. Zudem wurde von Seite der PE angemerkt, dass die industrielle Prozessketten für eine regionale Verwertung aktuell nicht vorhanden sind. Von Seiten der VR gab die Mehrheit an, dass eine große Hürde der Schutz von Know-How sei. Als letzter Punkt wurde von über 50 % der PE angegeben, dass die hohen Kosten einer regionalen Vernetzung zu den VR im Weg stehen würden. Als freie Anmerkung gab auch ein der befragten PE an, dass für ihn das aktuelle Abfallrecht eine große bürokratische Hürde darstellt.

Auf die Frage, welche Chancen in einer regionalen Vernetzung zu sehen sind, standen für über 70 % der VR Punkte wie höhere Schrottqualität, bessere Trennbarkeit, recyclinggerechtes Design und leichtere Demontage im Vordergrund. Von Seiten der PE gab es keine so eindeutige Aussage. Ca. 40 % sahen die zuvor genannten Punkte ebenfalls als mögliche Chancen aus einer regionalen Vernetzung an. Hinzu kam, dass knapp 40 % der PE angaben, eine Chance in der Unabhängigkeit von überregionalen Lieferketten zu sehen. Jedoch gaben auch drei der PE an, dass für sie eine rein regionale Vernetzung nicht ausreichend bzw. zielführend sei.

Als letzte Frage an sowohl PE als auch VR befasst sich mit den möglichen Maßnahmen, welche eine regionale Vernetzung vorantreiben können. Die Mehrheit der Befragten gab an, dass für sie Punkte wie Unterstützung oder Förderung der Politik und die Verringerung des bürokratischen Aufwandes am wichtigsten seien. Ebenso wurde von einem großen Teil die Nutzung von digitalen Informationstools als sinnvoll angesehen. Eher weniger wichtig wurden von Seiten der PE die Nutzung eines zentral geregelten Systems und

das Angebot von Weiterbildungs- und Schulungsprogrammen bewertet.

4.2 Umfrageergebnisse zur Kreislaufwirtschaft.

Im Zuge der Umfrage wurden ebenfalls Fragen zum Thema der Kreislaufwirtschaft und DfC gestellt. Hierbei wurden die Fragen speziell auf die zwei Zielgruppen zugeschnitten. Besonders die Seite der PE stand hierbei im Fokus, da ein DfC bereits im Entwicklungsprozess beginnt. Die erste Frage in diesem Abschnitt wurde jedoch an beide Parteien gestellt und sollte abfragen, welche Maßnahmen besonders wichtig für eine funktionierende Kreislaufwirtschaftsstrategie seien. Über 50 % der PE und über 70 % der VR gaben hier an, dass die Nutzung von bereits recycelten Werkstoffen für sie einen sehr wichtigen Punkt darstellt. Über 40 % von beiden Parteien sahen auch in der engeren Zusammenarbeit von PE und VR eine Maßnahme, welche zu einer funktionierenden Kreislaufwirtschaft beitragen kann. Von Seiten der PE waren zudem über 50 % der Auffassung, dass eine Erweiterung des Lebenszyklus, zum Beispiel durch Reuse oder Refurbishment, ebenfalls Teil einer Kreislaufwirtschaftsstrategie sein kann. Des Weiteren sahen 50 % der VR in der Nutzung von besser recycelbaren Werkstoffen eine wichtige Maßnahme zur Umsetzung einer Kreislaufwirtschaft. Im freien Kommentarteil der Frage wurde zudem der Punkt aufgeführt, dass der gesetzliche Rahmen hinsichtlich der Umsetzung und Regelung einer einheitlichen Kreislaufwirtschaft zwingen angepasst werden müsse. Die nächsten zwei Fragen richteten sich an die PE und befassten sich mit der Auswahl von Materialien und Fügeverfahren während des Entwicklungsprozesses. Die überwiegende Mehrheit der PE gab

hierbei an, dass für sie bei der Werkstoffauswahl die Performance und der Rohstoffpreis klar im Vordergrund stehen. Punkte wie Recyclingfähigkeit oder CO₂-Fußabdruck wurden als eher zweit- bis dritrangig eingestuft. Ein ähnliches Ergebnis lieferte die Frage zu verwendeten Fügeverfahren. Dazu gaben über 40 % der PE an, dass die mechanischen Verbindungseigenschaften sowie die Kosten die wichtigsten Auswahlkriterien darstellen. Kriterien wie Reparaturfähigkeit und Demontierbarkeit wurden von über 50 % der Befragten PE als niedrig oder sehr niedrig priorisiert. Auf die Frage, wieviel Informationen sie über die Entsorgungspfade ihrer Produkte an deren Lebensende haben, antworteten über 70 % der PE mit „Keine“ oder „Sehr wenige“. Den VR wurde zum Thema der Kreislaufwirtschaft die Frage gestellt, welche Hindernisse sie für die Rückgewinnung von Kunststoffen und Metallen aus Schrotteilen sehen. Ein VR gab an, dass es hier an einem ausreichenden Informationsfluss mangle. Ein weiterer gab an, dass für ihn besonders die schwere Trennung von stofflichen Verbindungen und die schlechte Sortenreinheit ein Problem darstelle.

4.3 Zusammenfassung

Die Fragen, welche in Kapitel 4.1 und 4.2 ausgewertet wurden als besonders relevant erachtet und daher hervorgehoben. Der gesamten Umfrage und deren Auswertung kann dem Anhang A2 entnommen werden. Die Auswertung der Umfrage zeigt grundlegend, dass der Gedanke der Kreislaufwirtschaft bereits in vielen deutschen Unternehmen angekommen ist. Anhand der Antworten, besonders von Seiten der VR, ist jedoch zu erkennen, dass eine funktionierende Kreislaufwirtschaft aktuell noch am fehlenden Austausch von Informationen

zwischen PE und VR scheitert. Die Mehrzahl der PE gab an, dass sie quasi keine Informationen über das Lebensende ihrer Produkte haben. Zudem werden im Designprozess bei den meisten PE immer noch Themen wie Recyclingfähigkeit, Demontierbarkeit oder Reparaturfähigkeit zu niedrig priorisiert. Um an dieser Stelle einen Wandel der Arbeitsweise voranzutreiben wurde von vielen Befragten auch eine aktive Unterstützung der Politik hinsichtlich Förderung, aber auch dem Abbau von Bürokratie gefordert. Die Förderung einer regionalen Vernetzung von PE und VR wurde von der Mehrheit der Befragten befürwortet. Allerdings gab auch über die Hälfte an, dass eine intensivere regionale Vernetzung aus ihrer Sicht nur in Kombination mit den bereits vorhanden globalen Netzwerken funktionieren kann.

5 Barrieren und mögliche Maßnahmen

5.1 Identifizierung von Barrieren

Basierend auf den Erkenntnissen aus der durchgeführten Umfrage, der Demontagestudie sowie den Besuchen bei verschiedenen Recyclingunternehmen konnten wir die folgenden Barrieren identifizieren. Diese Hindernisse wurden nach ihrer Priorität geordnet, um gezielte Maßnahmen zur Verbesserung der Kreislaufwirtschaft zu entwickeln.

1. Fehlende Transparenz für Produktdesigner hinsichtlich des End-of-Life-Verhaltens von Produkten:

Eine zentrale Herausforderung besteht darin, dass Produktdesigner nicht genügend Informationen darüber haben, was am Ende des Lebenszyklus eines Produkts geschieht. Diese Intransparenz erschwert es, nachhaltige Entscheidungen bereits in der Designphase zu treffen.

2. Hoher Bedarf an Digitalisierung:

Es besteht ein erheblicher Bedarf an digitalen Lösungen, um Materialströme aus verschiedenen Quellen zu erfassen und zu verfolgen. Zudem müssen regionale und überregionale Transportwege optimiert werden, um die Effizienz des gesamten Kreislaufsystems zu steigern.

3. Überregionale Geschäftstätigkeit als Herausforderung für regionale Ansätze:

Viele Unternehmen arbeiten überregional, wodurch ein rein regionaler Ansatz für die Optimierung von Materialflüssen als ineffizient

angesehen wird. Dies stellt eine Barriere dar, da die Vorteile regionaler Kreislaufwirtschaftsansätze oft nicht vollständig ausgeschöpft werden können.

4. Wirtschaftliche Bedeutung des verfügbaren Rezyklatmaterials:

Die Attraktivität von Recycling als Business Case variiert stark in Abhängigkeit von der Art des Materials und dem erforderlichen Demontageaufwand. Die fehlende Anerkennung des wirtschaftlichen Potenzials von Rezyklatmaterialien mindert die Motivation für Investitionen in Recyclingprozesse.

5. Seltene Legierungen und Materialien verhindern kontinuierliche Stoffströme:

Insbesondere seltenere Materialien und Legierungen erschweren die Aufrechterhaltung kontinuierlicher Stoffströme. Dies führt zu einer Unterbrechung des Recyclingprozesses und verhindert die effiziente Rückführung dieser Materialien in den Kreislauf.

5.2 Maßnahmen

1. Erhöhung der Transparenz für Produktdesigner:

Ein entscheidender Schritt zur Überwindung der Transparenzbarriere ist die Integration von Kreislaufwirtschafts-Prinzipien und spezifischen Designrichtlinien in die frühen Entwicklungsphasen. Beispielsweise spielt die Auswahl kompatibler Materialkombinationen eine zentrale Rolle, da sie den Recyclingprozess erheblich beeinflusst. Durch die Verwendung digitaler Tools können Produktdesigner frühzeitig die Auswirkungen ihrer Entscheidungen

auf die Zuordnung der Materialien zu verschiedenen Abfallkategorien erkennen und verstehen, wie sich dies auf die Recyclingquote (%) auswirkt.

Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die Wahl der Fügetechnologien. Die Zerlegestudie hat gezeigt, dass schwer trennbare Verbindungen den Recyclingprozess erschweren und die Effizienz senken. Daher sind Maßnahmen wie das „Design for Disassembly“ essenziell, um die Wiederverwertung zu erleichtern. In diesem Zusammenhang haben wir eine interne Technologie zur Auswahl von Fügetechniken entwickelt. Diese unterstützt die Designer in den frühen Phasen der Produktentwicklung, indem sie eine Bewertung der verschiedenen Fügetechnologien ermöglicht, um sicherzustellen, dass leicht trennbare Verbindungen verwendet werden und die Demontage vereinfacht wird.

2. Förderung der Digitalisierung in der Kreislaufwirtschaft:

Der Einsatz von Matching-Plattformen, die regionale und überregionale Materialflüsse digital abbilden, kann die Effizienz der Materialbeschaffung und -rückführung erheblich steigern. Durch automatisierte Datenverarbeitung können Recyclingkapazitäten besser genutzt und Transportwege optimiert werden.

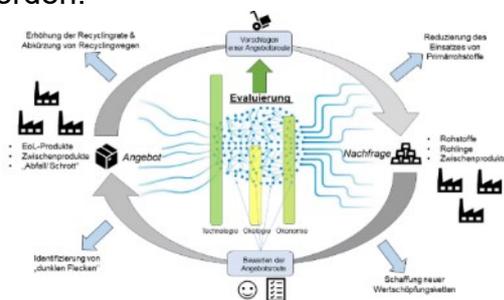


Abbildung 7 - Ein Konzept für eine digitale Matching-Plattform für effizientes und optimiertes Recyclingmaterial und -routen

Die in der Abbildung dargestellte Matching-Plattform veranschaulicht

einen integrativen Ansatz zur Optimierung von Materialflüssen innerhalb der Kreislaufwirtschaft. Der Prozess beginnt mit der Bewertung von Angebot und Nachfrage, wobei verschiedene Produktströme wie End-of-Life-Produkte, Zwischenprodukte und Schrott analysiert werden. Das Hauptziel der Plattform besteht darin, die Recyclingquoten zu erhöhen und gleichzeitig den Einsatz von Primärrohstoffen zu reduzieren. Zentral in der Abbildung ist die Evaluierung von Technologie, Ökologie und Ökonomie, die für die Entwicklung nachhaltiger und sowohl ökonomisch als auch ökologisch tragfähiger Angebote unerlässlich sind.

Auf der linken Seite der Abbildung werden die verfügbaren Angebote dargestellt, einschließlich Recyclingwege, Rohstoffe und Zwischenprodukte, während auf der rechten Seite die Nachfrage, beeinflusst durch die Bedürfnisse von Herstellern und Entsorgungsunternehmen, abgebildet wird. Ein wichtiger Aspekt des Plattformmodells ist die Identifizierung von ineffizienten oder nicht erfassten Materialflüssen, sogenannten „dunklen Flecken“. Durch diese Analyse können ungenutzte Potenziale zur Steigerung der Recyclingraten aufgedeckt werden.

Die Plattform fördert zudem die Schaffung neuer Wertschöpfungseffekte, indem sie den Austausch von Informationen und Materialien zwischen den verschiedenen Akteuren der Kreislaufwirtschaft erleichtert. Dabei liegt ein besonderer Fokus auf der Priorisierung regionaler Transaktionen. Diese Priorisierung stärkt lokale Wirtschaftsstrukturen und reduziert Transportwege, bevor überregionale Lösungen in Betracht gezogen werden, falls erforderlich.

Schließlich ermöglicht die kontinuierliche Überprüfung und Anpassung der Angebote, dass Materialien optimal genutzt werden. Dieser dynamische Prozess orientiert sich an technologischen Fortschritten und den Veränderungen der Marktanforderungen. Das Modell zeigt wie eine digitale Matching-Plattform als Katalysator in der Kreislaufwirtschaft fungieren kann, indem sie sowohl die Effizienz der Materialnutzung steigert als auch die Zusammenarbeit zwischen den Akteuren fördert, um den Übergang zu einer nachhaltigeren Wirtschaft zu beschleunigen.

3. Hybrider Ansatz für regionale und überregionale Verbindungen:

Ein hybrider Ansatz, der sowohl regionale als auch überregionale Verbindungen kombiniert, könnte als optimaler Weg zur Effizienzsteigerung betrachtet werden. Regionale Transaktionen sollten priorisiert werden, um Transportkosten und Emissionen zu reduzieren, während überregionale Verbindungen bei Bedarf genutzt werden können. Für Mercedes-Benz ist ein Beispiel für einen hybriden regionalen und überregionalen Ansatz ihr "Urban Recycling"-Pilotprojekt, das in Zusammenarbeit mit TSR Recycling GmbH ins Leben gerufen wurde. Diese Initiative konzentriert sich darauf, recycelte Rohstoffe, insbesondere durch Urban Mining, zu beschaffen, um den Anteil an Sekundärmaterialien in ihrer neuen Fahrzeugflotte zu erhöhen. Durch die Nutzung sowohl regionaler Ressourcen als auch größerer überregionaler Lieferketten möchte Mercedes-Benz Material "Downcycling" vermeiden und die Qualität der recycelten Materialien maximieren. Dies steht im Einklang mit ihrer Ambition 2039-Strategie, die eine Netto-CO₂-Neutralität für ihre Flotte anstrebt, einschließlich der

Verwendung von 40 % recycelten Materialien bis 2030. Das Projekt verdeutlicht, wie ein hybrider Ansatz zur Beschaffung und zum Recycling sowohl die regionale Effizienz als auch breitere Materialflüsse verbessern kann [16], [17].

4. Integration wirtschaftlicher KPIs für Rezyklatmaterialien:

Um Recycling wirtschaftlich attraktiver zu gestalten, sollten wirtschaftliche Kennzahlen (KPIs) in die Circularity-Methodik integriert werden. Unternehmen könnten dabei Materialkosten, Demontageaufwände und die Qualität des Rezyklats erfassen, um das wirtschaftliche Potenzial transparenter zu machen. Ein passendes Beispiel ist die „ChemCycling“-Strategie von BASF. Diese Strategie zielt darauf ab, den finanziellen Nutzen von hochwertigem recyceltem Kunststoff im Vergleich zu neuen Materialien hervorzuheben. BASF demonstriert, wie die Verwendung von hochwertigem Rezyklat nicht nur ökologische Vorteile mit sich bringt, sondern auch wirtschaftlich sinnvoll ist, indem sie die Kostenersparnisse und den Wert der recycelten Materialien verdeutlicht [18].

5. Entwicklung von Lösungen für seltene Legierungen und Materialien:

Für seltenere Legierungen und Materialien sind spezialisierte Recyclingmethoden notwendig. Unternehmen sollten in die Entwicklung von Technologien zur Rückgewinnung solcher Materialien investieren, um ihre kontinuierliche Verfügbarkeit zu gewährleisten.

6 Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Kurzstudie wurde untersucht, wie das Potenzial der Kreislaufwirtschaft in Baden-Württemberg besser genutzt werden kann, insbesondere durch eine stärkere regionale Zusammenarbeit zwischen Produktentwicklern und Recyclingunternehmen, um die Wettbewerbsfähigkeit zu fördern. Die Analyse umfasste die Prozesskette des Fahrzeugrecyclings, eine Demontagestudie verschiedener Fahrzeugkomponenten sowie die Identifizierung von Barrieren in den Bereichen Recycling und Produktentwicklung.

Basierend auf einer Umfrage und Besuchen bei mehreren Recyclingunternehmen wurden zentrale Barrieren aufgezeigt. Ein großes Problem besteht in der fehlenden Transparenz für Produktdesigner in Bezug auf das End-of-Life-Verhalten ihrer Produkte. Diese Informationslücke erschwert es, bereits in der Designphase nachhaltige Entscheidungen zu treffen, was die Kreislaufwirtschaft beeinträchtigt. Ein weiteres Hindernis ist der mangelnde Einsatz digitaler Lösungen, um Materialflüsse effizient zu verfolgen und zu optimieren. Zusätzlich wird das wirtschaftliche Potenzial von recycelten Materialien oft nicht ausreichend erkannt, was die Investitionen in Recyclingprozesse hemmt. Auch seltene Materialien und Legierungen stellen eine Herausforderung dar, da spezialisierte Technologien fehlen, um diese Materialien kontinuierlich in den Kreislauf zurückzuführen.

Um diese Barrieren zu überwinden, wurden mehrere Maßnahmen vorgeschlagen: Dazu zählen die Steigerung der Transparenz für

Produktdesigner durch frühzeitige Integration von Kreislaufwirtschaftsprinzipien in die Produktentwicklung, der Ausbau digitaler Plattformen zur Optimierung von Materialflüssen sowie die Einführung von wirtschaftlichen Kennzahlen zur besseren Bewertung von Rezyklatmaterialien. Ein hybrider Ansatz, der regionale und überregionale Verbindungen kombiniert, könnte ebenfalls dazu beitragen, Transportwege zu minimieren und die Wirtschaftlichkeit der Prozesse zu steigern, indem die notwendigen Materialflüsse bereitgestellt werden. Dies würde es ermöglichen, Materialien effizienter zu recyceln und sowohl regionale Ressourcen als auch größere überregionale Lieferketten zu nutzen, um den kontinuierlichen Fluss der benötigten Rohstoffe zu gewährleisten.

Die Kurzstudie zeigt deutlich, dass eine verbesserte Vernetzung zwischen Produktentwicklern und Recyclern auf regionaler Ebene erhebliches Potenzial hat, um die Kreislaufwirtschaft und damit die Wettbewerbsfähigkeit der Region Baden-Württemberg zu stärken.

7 Verwertung

Der Wissenstransfer ist ein entscheidender Prozess zur Verbesserung der Effektivität von Initiativen zur Kreislaufwirtschaft, insbesondere im Kontext der Automobil- und Recyclingbranche. Um die empfohlenen Wege dieser Kurzstudie zu realisieren, schlagen wir das folgende Konzept für den Wissenstransfer vor. Dabei betonen wir, dass Informationen, Fähigkeiten und Erkenntnisse nahtlos zwischen verschiedenen Akteuren — wie Produktentwicklern, Recyclingunternehmen, politischen Entscheidungsträgern und der Wissenschaft — fließen müssen, um die Ressourcennutzung zu optimieren und Nachhaltigkeit zu fördern. Zusätzlich sollten Präsentationen auf Konferenzen und Veranstaltungen genutzt werden, um die gewonnenen Erkenntnisse und Best Practices einem breiteren Publikum vorzustellen.

Aspekte des Wissenstransfers

1. Zusammenarbeit zwischen Sektoren:

Eine effektive Wissensvermittlung erfordert die Zusammenarbeit zwischen unterschiedlichen Sektoren. Workshops und Netzwerkveranstaltungen können direkte Interaktionen zwischen Recyclingunternehmen und Produktentwicklern ermöglichen. Dies fördert den Austausch bewährter Verfahren und innovativer Lösungen, die entscheidend sind, um die Produktgestaltung mit den Recyclingfähigkeiten abzustimmen.

2. Bildung und Schulung:

Die Aktualisierung der Lehrpläne, um Kurse über die Prinzipien der Kreislaufwirtschaft einzuschließen, ist entscheidend. Praktische Erfahrungen, wie Exkursionen zu Recyclinganlagen, helfen Studierenden verschiedener Fachrichtungen, die Bedeutung von Nachhaltigkeit und Recycling zu verstehen. Dieser praxisorientierte Ansatz bereitet zukünftige Fachkräfte darauf vor, kreislaufwirtschaftliche Praktiken in ihren jeweiligen Bereichen umzusetzen.

3. Politische Einbindung:

Die Einbindung von politischen Entscheidungsträgern stellt sicher, dass die Bedürfnisse der Industrie in der Gesetzgebung berücksichtigt werden. Ein Dialog zwischen Vertretern der Industrie und politischen Führungskräften kann zu Maßnahmen führen, die nachhaltige Praktiken unterstützen und gleichzeitig die wirtschaftliche Wettbewerbsfähigkeit erhalten.

4. Forschungs- und Entwicklungsinitiativen:

Weiterführende Studien und Forschungsprojekte können auf dem bestehenden Wissen aufbauen, um innovative Lösungen zu entwickeln. Die Schaffung interdisziplinärer Konsortien ermöglicht es, vielfältige Expertise zu bündeln, um komplexe Herausforderungen im Bereich Recycling und Nachhaltigkeit anzugehen. Solche Kooperationen können die Entwicklung und Umsetzung effektiver Praktiken in der Kreislaufwirtschaft vorantreiben.

5. Digitale Plattformen für Wissensaustausch:

Die Nutzung digitaler Plattformen kann die Verbreitung von Informationen und Ressourcen erleichtern. Diese

Plattformen können als Repository für Fallstudien, Forschungsergebnisse und bewährte Verfahren dienen, die für verschiedene Akteure der Kreislaufwirtschaft zugänglich sind.

8 Ausblick

Die Ergebnisse dieser Kurzstudie bieten wertvolle Ansätze zur Verbesserung der Kreislaufwirtschaft im Automobilsektor. Um die identifizierten Herausforderungen anzugehen, sollte der Fokus auf der kontinuierlichen Zusammenarbeit zwischen Produktentwicklern und Recyclingunternehmen liegen. Workshops und Schulungsprogramme könnten dabei helfen, den Wissenstransfer zu fördern und die Sensibilisierung für die Bedeutung nachhaltiger Designpraktiken zu erhöhen.

Zukünftige Forschungsprojekte sollten sich darauf konzentrieren, die entwickelte digitale Matching-Plattform zu testen und zu optimieren. Diese Plattform hat das Potenzial, die Transparenz in den Materialströmen zu erhöhen und die Integration von Recyclingprozessen in den Produktentwicklungszyklus zu unterstützen.

Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die politische Unterstützung für nachhaltige Initiativen, die Innovationen in der Kreislaufwirtschaft begünstigen. Ein interdisziplinärer Ansatz, der Akteure aus Industrie, Wissenschaft und Politik einbezieht, wird entscheidend sein, um langfristige Lösungen zu entwickeln und die Wettbewerbsfähigkeit von Baden-Württemberg im globalen Kontext zu sichern.

Literaturverzeichnis

[1] European Commission. 2015. Closing the Loop - An EU Action Plan for the Circular Economy. Brussels: European Commission.

[2] VDI (Vereinigung Deutscher Ingenieure). 2022. Demontage und Sortierung von Fahrzeugteilen. Düsseldorf: VDI.

[3] <https://www.deutschlandfunk.de/40-jahre-kampagne-jute-statt-plastik-bewusstsein-fuer-100.html>

[4] Kopp, Gundolf und Beeh, Elmar und Goede, Martin und Rafflenbeul, Lukas und Stehlin, Marc (2008) Super Light Car - lightweight construction thanks to a multi-material design and function integration; European Transport Research Review, Springer Verlag, DOI [10.1007/s12544-008-0001-2](https://doi.org/10.1007/s12544-008-0001-2)

[5] LCA and decarbonisation programm at Audi; Dr. C. Haberling, C. Praun; LCA & Sustainable Vehicles Congress, 14.07.2021

[6] Große, Thomas und Fischer, Fabian und Hillmann, Jürgen und Berthold, Dirk und Piazza, Giovanni und Käse, David Benjamin und Beeh, Elmar und Kohl, Daniel und Nguyen, Hoa (2019) Holz als Strukturwerkstoff im modernen Automobilbau. Werkstoffplus Auto, 20.-22. Feb. 2019, Stuttgart, Deutschland

[7] nach DIN EN ISO 14040 und 14044

[8] EU Ökodesign-Richtlinie oder Energieverbrauchsrelevante-Produkte-Richtlinie, ErPRL, Richtlinie 2009/125/EG

[9] <https://www.umweltbundesamt.de/the>

[men/neue-waschmaschinen-kuehlschraenke-co-ab-2021](https://www.umweltbundesamt.de/the-men/neue-waschmaschinen-kuehlschraenke-co-ab-2021)

[10] Verordnung über die Überlassung, Rücknahme und umweltverträgliche Entsorgung von Altfahrzeugen (Altfahrzeugverordnung - AltfahrzeugV) vom 04.07.1997

[11] Stakeholder-Interview mit Michael Just und Alexander Dampmann von der Georg Fischer AG im Rahmen der DLR-internen Kurzstudie „KI-basierte Kreislaufwirtschaft“

[12] Marchese, D.; Giosuè, C.; Staffolani, A.; Conti, M.; Orcioni, S.; Soavi, F.; Cavalletti, M.; Stipa, P. An Overview of the Sustainable Recycling Processes Used for Lithium-Ion Batteries. Batteries 2024, 10, 27. <https://doi.org/10.3390/batteries10010027>

[13] Automobile Recycling Policy: Findings and Recommendations Authors: S. Kumar et al. Year: 2013 Publisher: ResearchGate DOI: Not available Link: https://www.researchgate.net/publication/37593069_Automobile_Recycling_Policy_Findings_and_Recommendations

[14] Karagoz, S., Aydin, N., & Simic, V. (2019). End-of-life vehicle management: A comprehensive review - journal of material cycles and waste management. Retrieved from <https://link.springer.com/article/10.1007/s10163-019-00945-y>

[15] <https://www.remanufacturing.eu/assets/pdfs/remanufacturing-market-study.pdf>

[16] <https://group.mercedes-benz.com/responsibility/sustainability/climate-environment/hydro-green-aluminium.html>

[17]

<https://www.esgtoday.com/mercedes-benz-launches-urban-recycling-pilot-project-to-source-recycled-raw-materials-for-new-cars/>

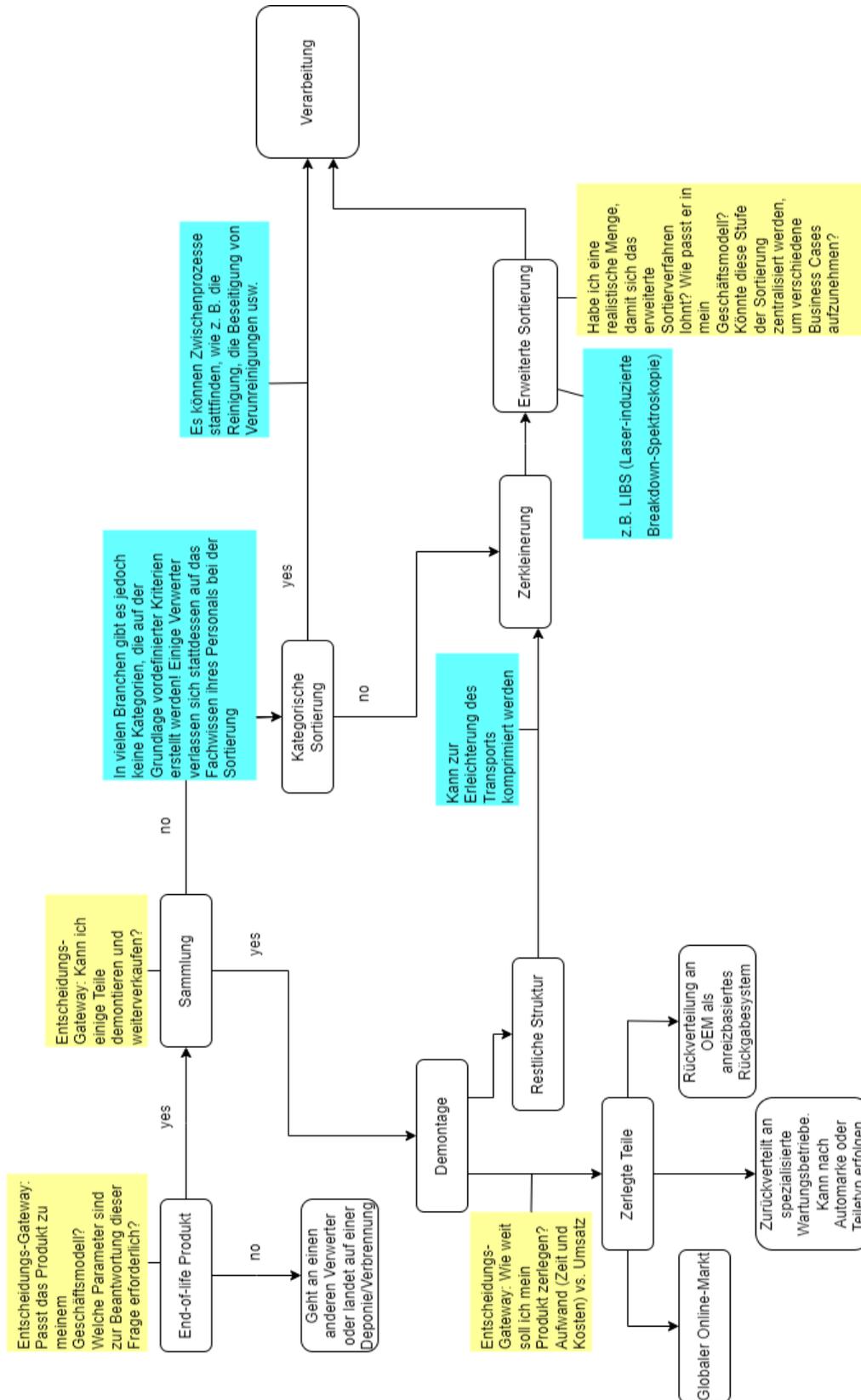
[18]

<https://www.basf.com/global/en/who-we-are/sustainability/we-drive-sustainable-solutions/circular-economy/mass-balance-approach/chemcycling>

Anhang A1: Bilder

A1.1: Die Prozesskette des Fahrzeugrecyclings

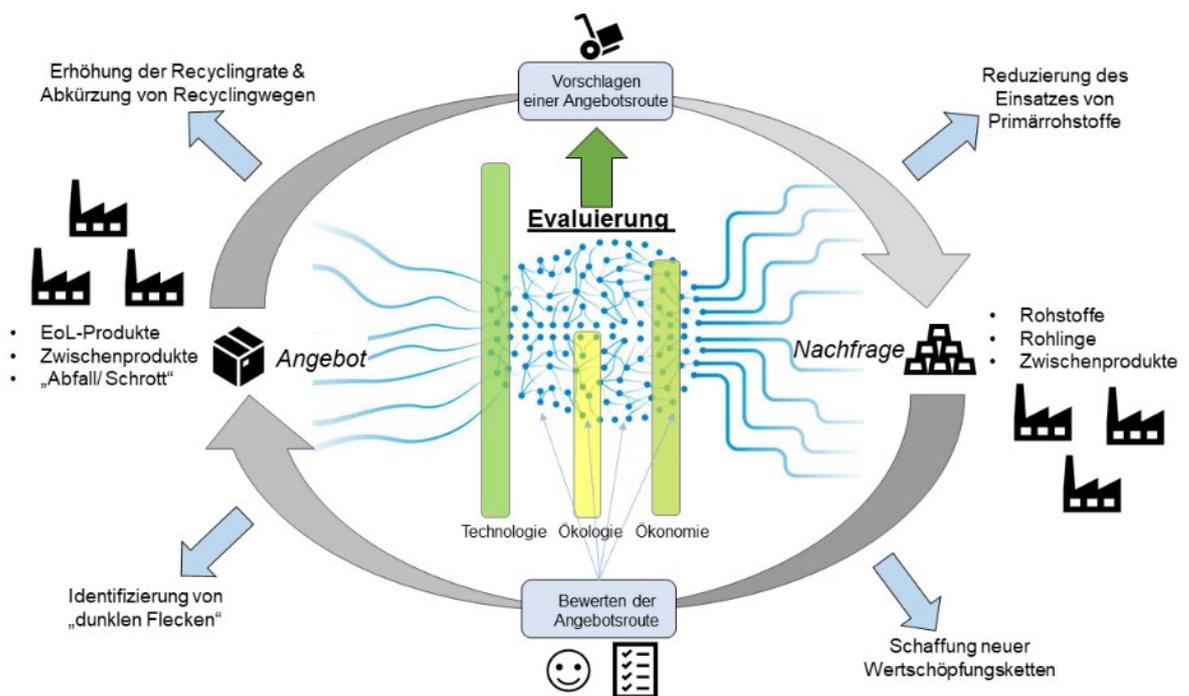
Die Prozesskette des Fahrzeugrecyclings



A1.2: Tabellarische Darstellung der Vermögensströme innerhalb einer stilisierten Autorecycling-Infrastruktur [13]

Actor		Source of Income/Recipient of Expense									
		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
A	Last User	-V	+/-								
B	Dismantler	-/+	-P	+		?	+	+	+		-
C	Shredder		-	-P	+	?		+			-
D	Non-Ferrous Separator			-	-P	?			+		-
E	New Processors		?	?	?	-P	+?	+?	+?	+	-
F	Used Parts Market		-			-?	+V				
G	Ferrous Scrap Market		-	-		-?		+V			
H	Nonferrous Scrap Market		-		-	-?			+V		
I	New Scrap Market					-				+V	
J	Landfill		+	+	+	+					-P

A1.3: Ein Konzept für eine digitale Matching-Plattform für effizientes und optimiertes Recyclingmaterial und -routen



A1.4: Analyzierte Komponenten im Rahmen der Zerlegestudie



A1.5: Zerlegestudie Lenkrad BMW

Aufwand	25 min
Benötigte Hilfsmittel	Schraubendreher Cutter

Lenkrad
BMW 7er (G11, G12)
Oberklasse

A1.6: Zerlegestudie Lenkrad Opel



A1.7: Zerlegestudie Lenkrad Kia



Lenkrad

Kia Sportage (QL, QLE)

SUV Sport Utility Vehicle

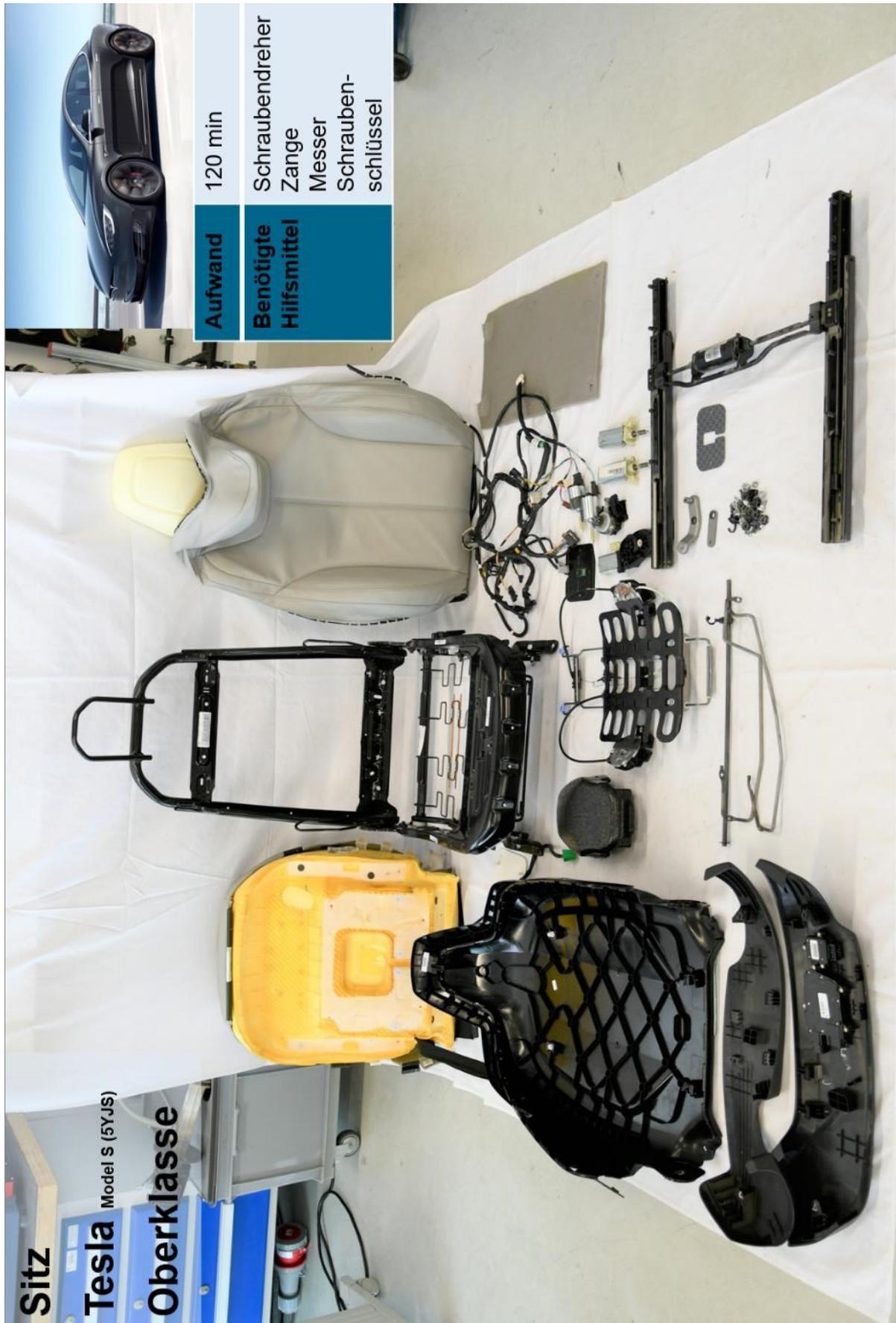
Aufwand

15 min

**Benötigte
Hilfsmittel**

Schraubendreher
Dremel

A1.8: Zerlegestudie Sitz Tesla



A1.9: Zerlegestudie Sitz Audi



A1.10: Zerlegestudie Sitz Mercedes



A1.12: Zerlegestudie Anlasser ATL Autotechnik



A1.13: Zerlegestudie Anlasser Alanko



Aufwand	20 min
Benötigte Hilfsmittel	Schraubendreher Zange Akkuschrauber

Anlasser
Alanko
Basis

A1.14: Zerlegestudie Scheinwerfer BMW

<p>Scheinwerfer BMW 1er (F20, F21) Kompaktklasse</p>		<p>Aufwand 50 min</p> <p>Benötigte Hilfsmittel Schraubendreher Beißzange Dremel</p>
---	---	---



A1.15: Zerlegestudie Scheinwerfer Seat

Scheinwerfer

Seat Leon ST (5F)

Kompaktklasse



Aufwand	75 min
Benötigte Hilfsmittel	Schraubendreher Beißzange Dremel

A1.16: Zerlegestudie Scheinwerfer Dacia



A1.18: Zerlegestudie Außenspiegel VW



A1.19: Zerlegestudie Außenspiegel Dacia



Außenspiegel

Dacia Lodgy (JS)

Van



Aufwand

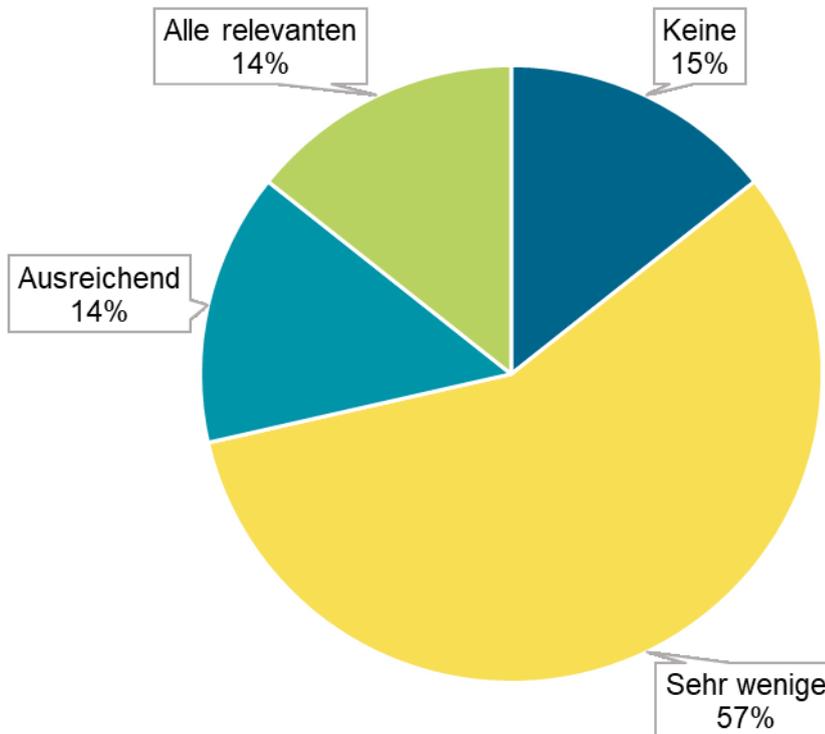
15 min

**Benötigte
Hilfsmittel**

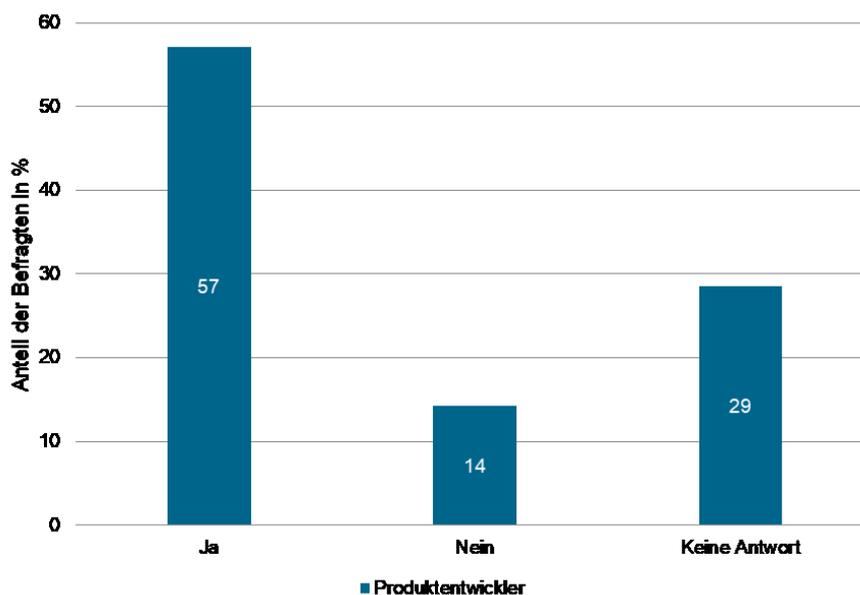
Schraubendreher
Zange

Anhang A2: Umfrage

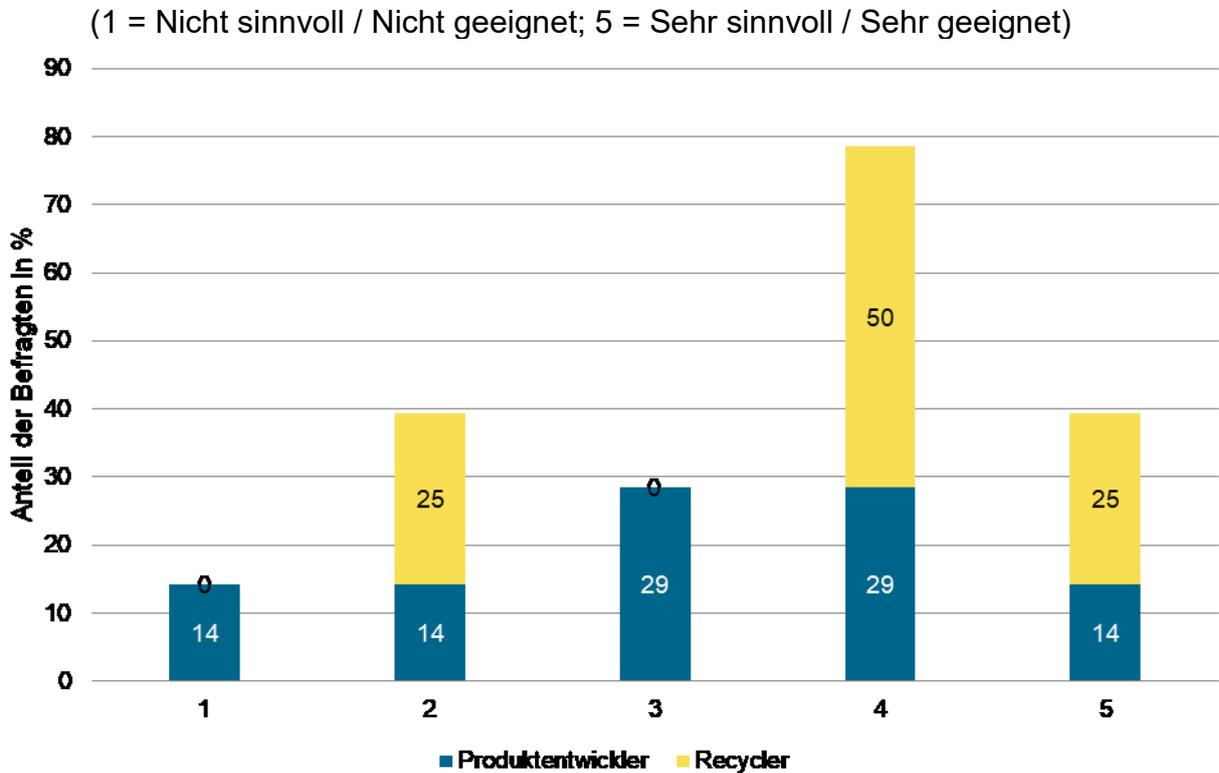
A2.1: *“Wie viele Informationen haben Sie über die Entsorgungspfade Ihrer Produkte an deren Lebensende?” (PE)*



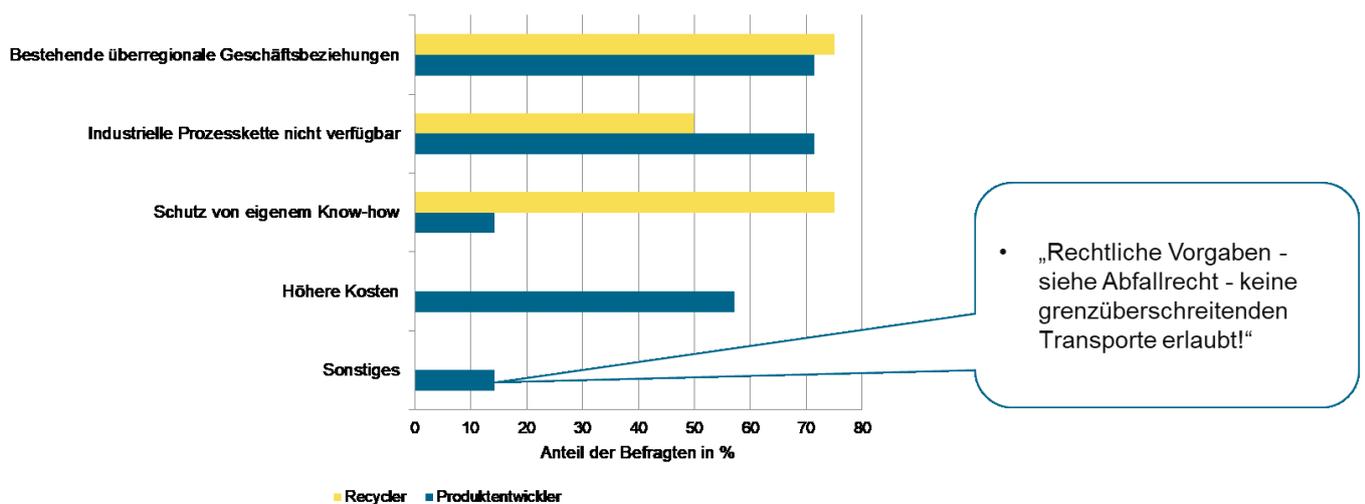
A2.2: *“Wäre es für Sie in Bezug auf die Gestaltung Ihrer Produkte nützlich, mehr Informationen über die Recyclingprozesse am Lebensende zu erlangen?” (PE)*



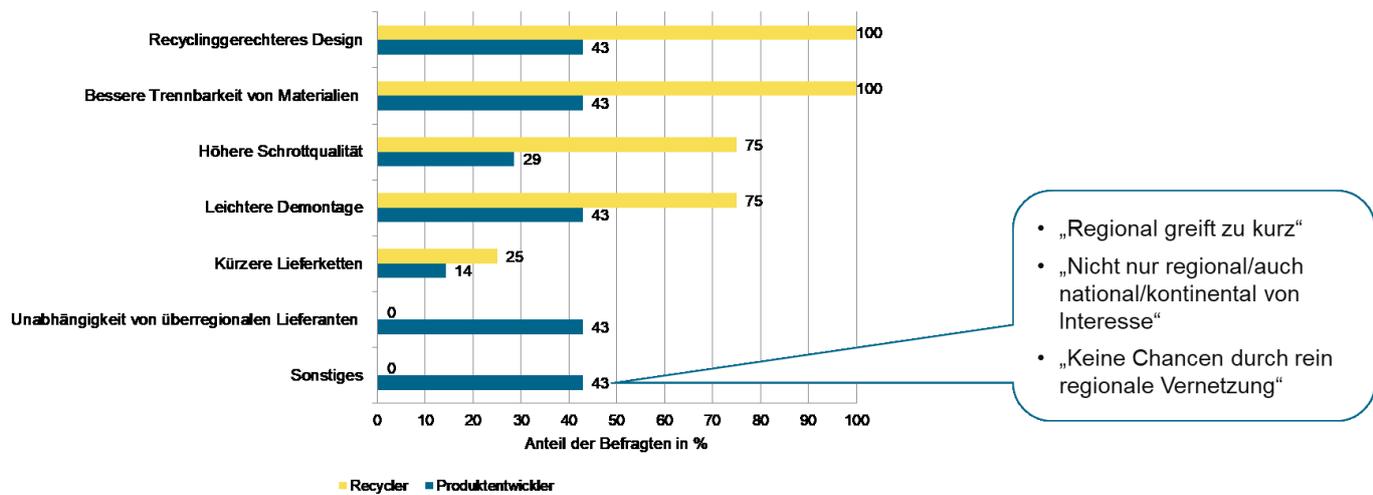
A2.3: “Halten Sie eine regionale Vernetzung von Entsorgern und der Automobilindustrie inkl. Zulieferer in Baden-Württemberg für sinnvoll/geeignet, um eine verbesserte Recyclingfähigkeit von Produkten zu erzielen?“ (PE + VR)



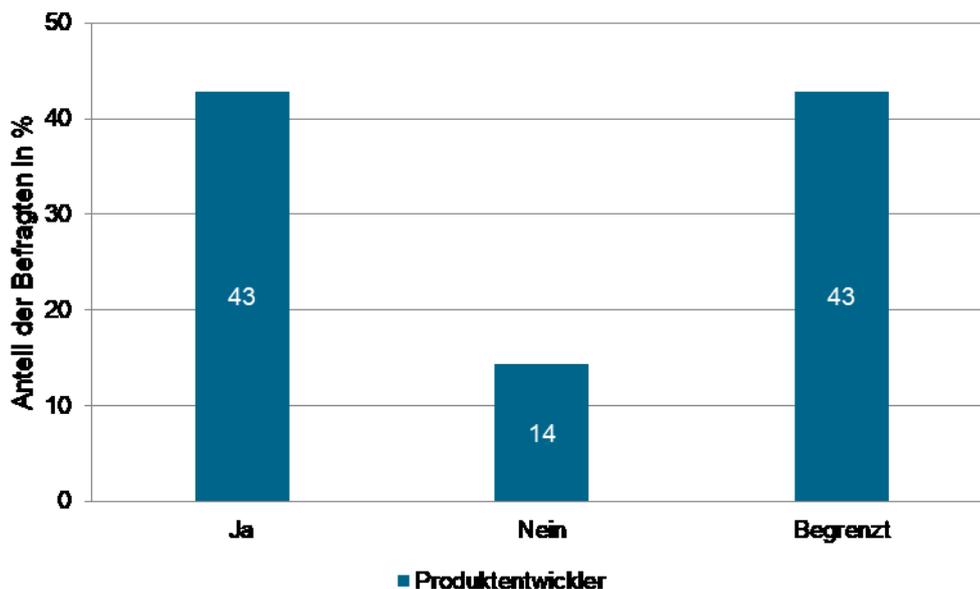
A2.4: „Wo sehen Sie Barrieren für eine regionale Vernetzung von Entsorgern und Produktentwicklern?“(PE + VR)



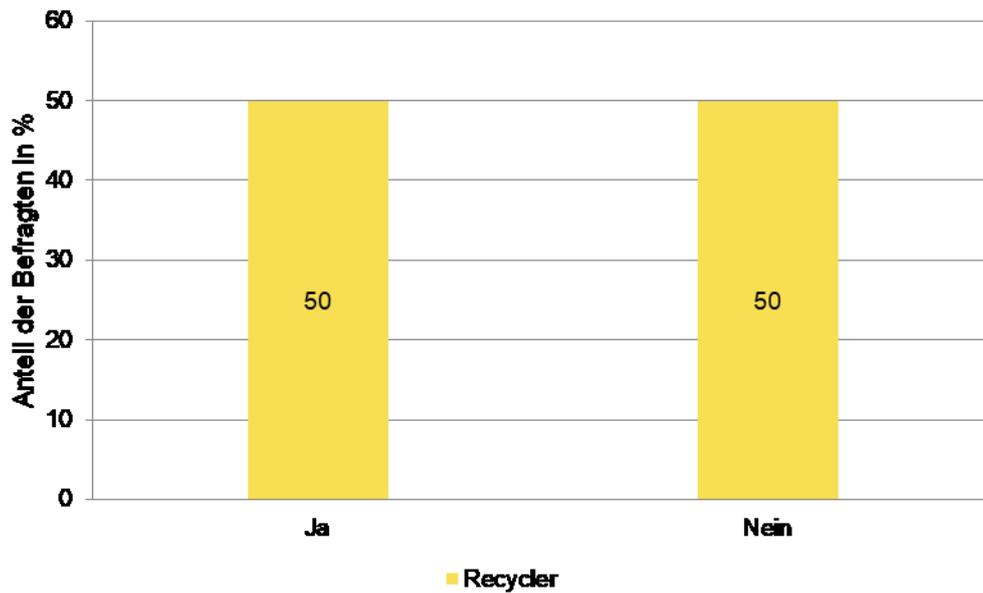
A2.5: „Welche Vorteile/Chancen sehen Sie durch eine regionale Vernetzung von Entsorgern und Produktentwicklern?“ (PE +VR)



A2.6: „Bestehen in Ihrem Unternehmen schon Kontakte zu Recyclingfirmen, die Ihnen relevante Informationen über die Verwertung Ihrer Produkte zur Verfügung stellen könnten?“ (PE)

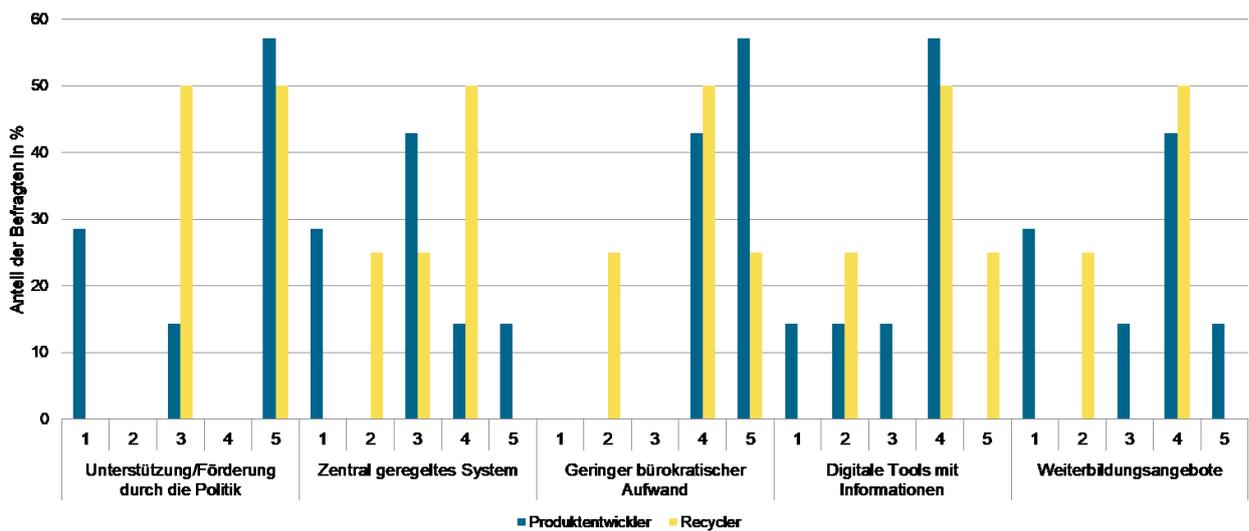


A2.7: „Besteht in Ihrem Netzwerk die Möglichkeit, Hinweise und Empfehlungen an Produktentwickler zu geben?“ (VR)



A2.8: „Für wie wichtig halten Sie die folgenden Punkte an eine regionale Vernetzung von Entsorgern und Produktentwicklern?“ (PE + VR)

(1 = Nicht wichtig; 5 = Sehr wichtig)



A2.9: „Hätten Sie weitere Anforderungen/Wünsche an eine regionale Vernetzung von Entsorgern und Produktentwicklern?“

Produktentwickler:

- „Entwickeln effizienter Technologien die auch mit exotischen Werkstoffen kostengerecht umgehen kann.“
- „Global agierende Unternehmen müssen über regionale Vernetzung hinausdenken. Die Gesetzgebung untersagt grenzüberschreitende Transporte, die für eine hochwertige Kreislaufschließung notwendig sind. Zudem müssten Unternehmen sich als Abfallwirtschaftsbetrieb registrieren, was hohen bürokratischen und kostenintensiven Aufwand bedeutet.“

Recycler:

- „Digitales Zusammenwirken.“
- „Offener fairer Dialog, erworbene Kenntnisse werden nicht für "Cherry-picking" ausgenutzt.“

A2.10: „Welche Maßnahmen werden im Rahmen der Kreislaufwirtschaftsstrategie in Ihrem Unternehmen bereits umgesetzt?“

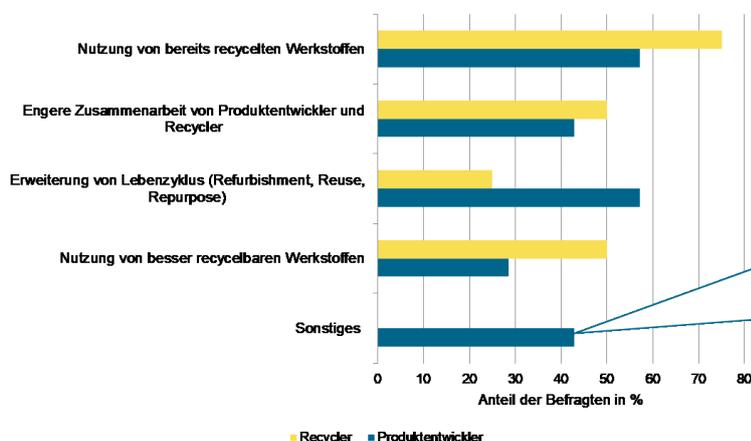
Produktentwickler:

- „Soweit kostentechnisch möglich werden die Produktionsabfälle dem Recycling zugeführt.“
- „ECO-Design & Entwicklung spezifischer interner Kreislaufprozesse.“
- „Beleuchtung komplette Prozesskette einschl. Recycling bereits bei Produktentstehung.“

Recycler:

- „Legierungsentwicklung zu mehr Einsatz von verfügbarer Kreislaufmenge“
- „Unternehmensweiter Nachhaltigkeitsbericht. Verankerung der Kreislaufwirtschaftsstrategie in den Unternehmenszielen. Aufbau Kompetenz für LCA-/PCF-Berechnung.“

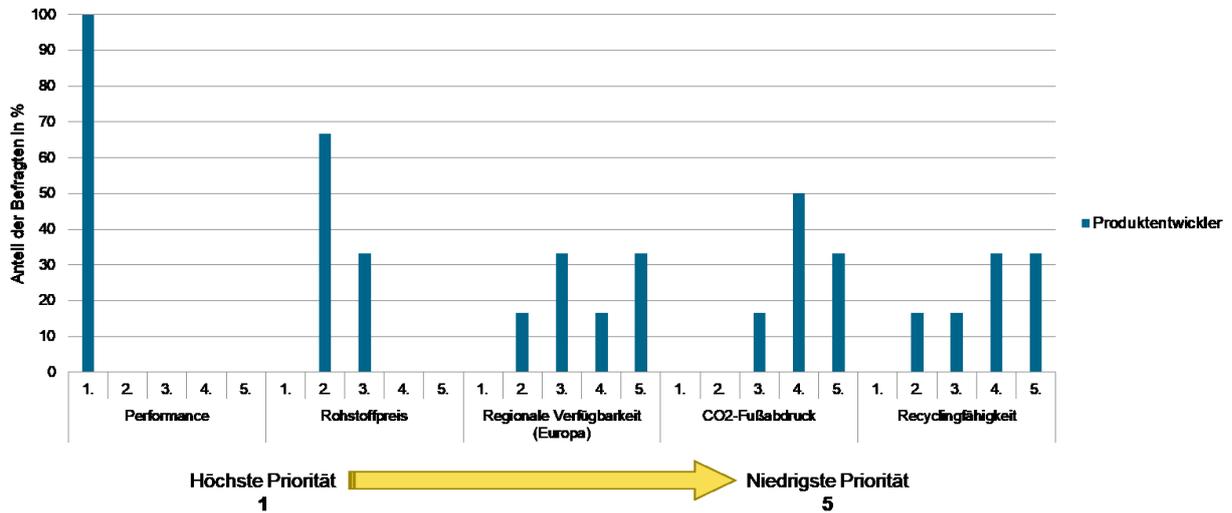
A2.11: „Welche Maßnahmen sehen Sie als besonders wichtig an, um eine funktionierende Kreislaufwirtschaftsstrategie im Unternehmen zu implementieren?“ (PE + VR)



- „Zurückführen der Produkte zu hochwertigen Rohstoffen.“
- „Gesetzlicher Rahmen muss zwingend angepasst werden im Sinne einer Kreislaufwirtschaft; neue Geschäftsmodelle, die einen Return sicherstellen; vollautomatisierte Demontage & Bewertung entsprechender Produkte im Zuge des EoL.“
- „Zahlungsbereitschaft Kunden“

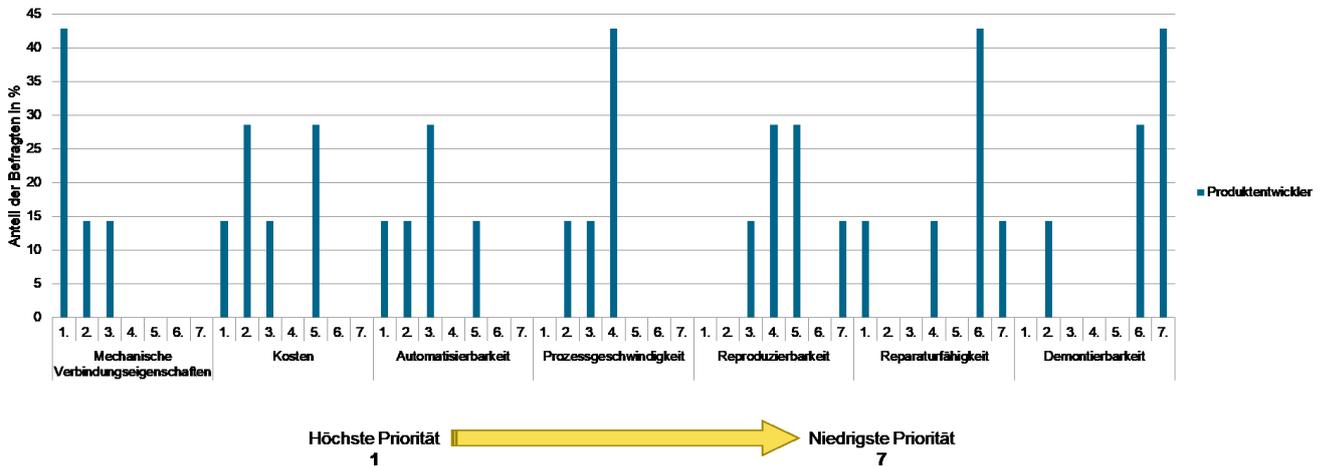
A2.12: „Nach welchen Kriterien im Produktdesign werden in Ihrem Unternehmen/Arbeitsbereich Materialien ausgewählt?“ (PE)

(Reihenfolge von 1 bis 5)



A2.13: „Nach welchen Kriterien werden für Ihre Produkte Fügetechniken ausgewählt?“ (PE)

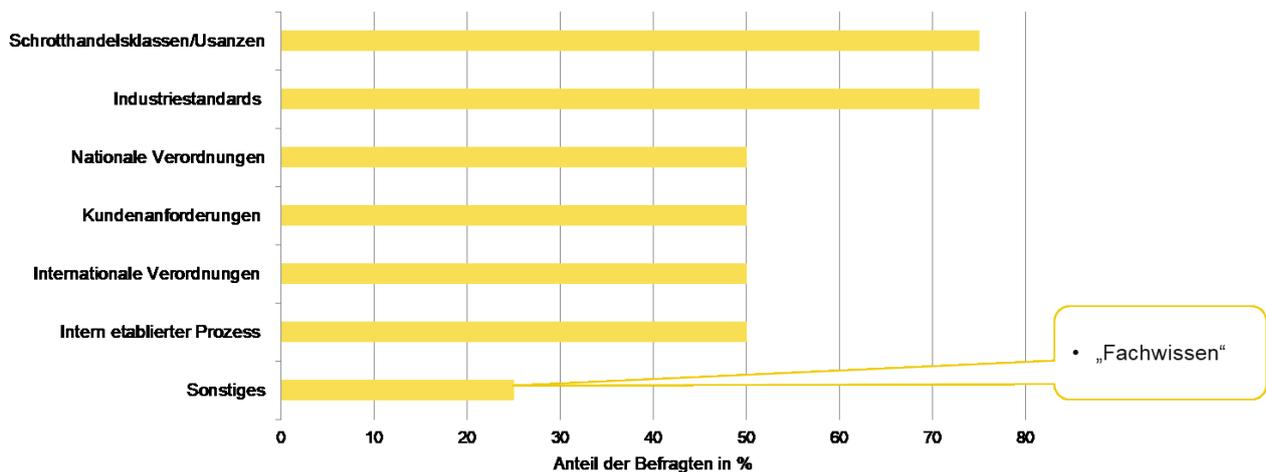
(Reihenfolge von 1 bis 7)



A2.14: „Wo sehen Sie aktuell noch Hindernisse für die Rückgewinnung von Kunststoff aus Metallteilen und umgekehrt?“ (VR)



A2.15: „Wie wird bei Ihnen der Grenzwert zur Vermeidung unerwünschter Verunreinigungen festgelegt?“ (VR)



A2.16. „Haben Sie Ideen/Hinweise/Anmerkungen bezüglich einer regionalen Vernetzung von Entsorgern und Produktentwicklern?“

