



# **Circular Economy für Zulieferunternehmen in der Automobilindustrie: Herausforderungen und Lösungsansätze**

Anita Schallenberg, M. Sc.

Prof. Dr.-Ing. Claus Lang-Koetz

Prof. Dr.-Ing. Frank Bertagnolli

Institut für Industrial Ecology (INEC) – Hochschule Pforzheim  
Tiefenbronner Str. 65, 75175 Pforzheim

12. 5. 2025

*Diese Kurzstudie entstand im Projekt Transformationsnetzwerk Nordschwarzwald  
(TraFoNetz)*

DOI: 10.60846/xpba-5w32

Kontakt: [claus.lang-koetz@hs-pforzheim.de](mailto:claus.lang-koetz@hs-pforzheim.de)

gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Klimaschutz

## **Executive Summary**

Die Circular Economy (CE) etabliert sich in Europa als wichtige Strategie, um wirtschaftliches Wachstum vom Verbrauch endlicher Ressourcen zu entkoppeln. In der Automobilindustrie – einem der wichtigsten Wirtschaftszweige Deutschlands – könnte CE mitunter erhebliches Innovationspotenzial bieten. Besonders Automobilzulieferer stehen dabei im Fokus, da sie maßgeblich zur Entwicklung und Produktion zukunftsfähiger Fahrzeugkomponenten beitragen. Dennoch ist bislang unklar, wie weit CE-Konzepte in dieser Branche bereits umgesetzt werden und welche Hürden dabei bestehen.

Ziel der vorliegenden Studie ist es, zentrale Herausforderungen und Lösungsansätze für die Implementierung von CE bei Automobilzulieferern zu identifizieren. Die Analyse basiert auf zwei systematischen Literaturrecherchen und 16 Experteninterviews mit Vertretern von Zulieferbetrieben aus Deutschland, Österreich und der Schweiz. Im Mittelpunkt stehen Teile- und Materialzulieferer der OEM.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Umsetzung von CE in der Automobilzulieferindustrie durch technische, wirtschaftliche und strukturelle Hemmnisse erschwert wird. Ein zentrales Problem stellt der Einsatz von Sekundärmaterialien dar: Ihre Qualität, Sortenreinheit und Verfügbarkeit reichen oft nicht aus, um die hohen Sicherheitsanforderungen der Branche zu erfüllen. Auch die Rückführung und Wiederverwendung von Zulieferteilen wird durch regulatorische Vorgaben, mangelnde Transparenz und fehlende Rücklaufstrukturen erschwert. Remanufacturing wird bislang kaum praktiziert, nicht zuletzt wegen logistischer Hürden und fehlender wirtschaftlicher Anreize. Auch ist bei sicherheitsrelevanten Bauteilen und den damit verbundenen hohen Qualitätsanforderungen an Zulieferteile die Verwendung von Recyclingmaterialien sehr eingeschränkt. Darüber hinaus ist das Wissen über den Verbleib der Teile am Ende des Produktlebenszyklus (EOL) begrenzt. Designentscheidungen orientieren sich selten an einer späteren Demontage oder Wiederverwertung. In der Lieferkette herrscht zudem ein erhebliches Kommunikationsdefizit: CE-relevante Informationen werden kaum systematisch geteilt, und es fehlt an einheitlichen Instrumenten zur Messung und Steuerung von Zirkularität.

Als Lösungswege wurden unter anderem identifiziert: langlebigere Materialien und Produkte, modularer Aufbau und Standardisierung, die Integration von CE-Prinzipien bereits im Designprozess, sowie die Nutzung digitaler Systeme wie IMDS oder Catena-X zur Verbesserung der Rückverfolgbarkeit. Die enge Kooperation mit OEMs im Rahmen von Co-Engineering-Prozessen wird als Schlüsselfaktor gesehen, um CE-Vorgaben in die Spezifikationen einfließen zu lassen. Auch Simulationen und Lebensdauertests werden als hilfreich zur CE-Integration genannt.

Die Ergebnisse unterstreichen: Technologische Innovationen allein reichen nicht aus. Eine erfolgreiche Transformation erfordert vielmehr ein Umdenken auf systemischer Ebene – in der Zusammenarbeit, in der Verantwortungsteilung entlang der Lieferkette und in der strategischen Ausrichtung der Unternehmen. CE kann so nicht nur ökologische, sondern auch ökonomische Vorteile bieten – etwa durch Rohstoffsicherung, Innovationsimpulse und Imagegewinne.

Für die Zukunft kommt es darauf an, CE-Anforderungen und Sicherheitsstandards stärker zu harmonisieren, Rückführungsprozesse zu stärken und digitale Transparenz über den gesamten Lebenszyklus hinweg zu schaffen. Damit dies gelingt, müssen insbesondere auch kleine und mittlere Zulieferer aktiv eingebunden und unterstützt werden.

*Diese Kurzstudie basiert auf einer detaillierten Analyse in der Veröffentlichung Schallenberg, 2024.*

## Inhaltsverzeichnis

Executive Summary.....	1
1 Einleitung.....	4
2 Circular Economy und die Automobilzulieferindustrie .....	6
2.1 Circular Economy: Einführung .....	6
2.2 Die Automobilzuliefererindustrie .....	7
2.3 Automobillebenszyklus und zirkuläre Betrachtung.....	8
2.4 Vorteile der Umsetzung von CE bei Zulieferern .....	10
3 Methodik der Studie .....	11
4 Ergebnisse .....	13
4.1 Ergebnisse der Literaturanalyse .....	13
4.2 Ergebnisse der Interviews: Herausforderungen .....	15
4.2.1 Herausforderungen Primär- vs. Sekundärmaterialien .....	16
4.2.2 Herausforderungen wiederverwendete Zulieferteile .....	18
4.2.3 Herausforderungen EOL und Kreislaufschließung.....	19
4.2.4 Herausforderungen Produktverwertung EOL.....	19
4.2.5 Herausforderungen Kommunikation und Instrumente .....	20
4.2.6 Zwischenfazit zu Herausforderungen aus Interviews.....	20
4.3 Ergebnisse der Interviews: Lösungen .....	21
4.3.1 Lösungen Lebensdauererlängerung .....	23
4.3.2 Lösungen Produktdesign und Innovation.....	24
4.3.3 Lösungen EOL und Kreislaufschließung.....	27
4.3.4 Lösungen Kommunikation .....	28
4.3.5 Zwischenfazit zu den ermittelten Lösungen .....	29
5 Fazit und Ausblick .....	30
6 Literaturverzeichnis .....	32

## 1 Einleitung

Circular Economy (CE) ist ein Wirtschaftsmodell, bei dem vorhandene Materialien und Produkte so lange wie möglich genutzt, wiederverwendet, repariert, aufgearbeitet und recycelt werden. Auf diese Weise wird der Lebenszyklus von Produkten verlängert. Erreichen diese das Ende ihrer Lebensdauer, verbleiben ihre Materialien möglichst lange im Wirtschaftskreislauf. Sie können wiederholt produktiv eingesetzt werden und so weiterhin Wert schaffen. (Deutsches Institut für Normung e.V., 2023, S. 10; European Commission, 2020c, S. 2)

Das Konzept der CE hat sich insbesondere in Europa als Rahmen etabliert, um den Wohlstand von der Nutzung endlicher Ressourcen zu entkoppeln. (European Commission, 2020b, S. 2; Fischer-Kowalski et al., 2011, S. 46 ff.) Die Europäische Kommission treibt diesen Wandel mit politischen Maßnahmen wie dem Circular Economy Action Plan aktiv voran. (European Commission, 2020c) Unternehmen stehen dadurch vor der Herausforderung, ihre bestehenden Arbeits- und Wirtschaftsweisen an die Ziele der CE anzupassen. (Hopkinson et al., 2018, S. 1)

Deutschland kommt als führendem Automobilproduzenten Europas eine zentrale Rolle bei der Umsetzung von CE in der Branche zu. (European Environment Agency, 2016, S. 13; Germany Trade & Invest, 2023, S. 3; Sonar et al., 2022, S. 3636) Die Automobilindustrie trägt 4,7 % zur Bruttowertschöpfung Deutschlands bei und ist damit ein bedeutender wirtschaftlicher Akteur.

Das zunehmende Umweltbewusstsein der Endkunden und zunehmende Regularien erfordern es, dass sich Unternehmen mit CE auseinandersetzen, um wettbewerbsfähig zu bleiben und nachhaltige Produkte anbieten zu können. CE birgt zudem ein erhebliches Innovationspotenzial, das bislang nicht vollständig ausgeschöpft wird. (Jepsen & Zimmermann, 2023) Besonders relevant sind hier die Automobilzulieferer, denn Innovationen der Fahrzeughersteller wären ohne deren Beitrag kaum denkbar – rund drei Viertel aller Innovationen stammen aus der Zulieferindustrie. (Jakhar et al., 2020, S. 11; Verband der Automobilindustrie, 2018)

Derzeit ist unklar, in welchem Umfang Zulieferer CE-Strategien bereits umsetzen. (Prochatzki et al., 2023, S. 11) Es besteht daher ein Bedarf, besser zu verstehen, wie sie mit CE umgehen und welche Herausforderungen bei der Implementierung auftreten. (Awan et al., 2021, S. 2045) Diese Studie untersucht deshalb zentrale

Herausforderungen und potenzielle Lösungsansätze zur Umsetzung von CE bei Automobilzulieferern.

Zulieferer der Automobilindustrie bewegen sich dabei in mehreren Spannungsfeldern:

1. **Traditionelle vs. kreislaufwirtschaftliche Ansätze:** Der bislang dominierende lineare Ansatz (Herstellung – Nutzung – Entsorgung) steht im Widerspruch zu den Prinzipien der CE, die auf Ressourcenschonung und Wiederverwendung abzielen. (Fehrer & Wieland, 2021, S. 615; Rodríguez-González et al., 2022, S. 2)
2. **Individuelle- vs. Branchenveränderung:** Einzelne Zulieferer können CE-Praktiken implementieren, stoßen dabei jedoch auf strukturelle Barrieren innerhalb der Branche und der Ebene der OEM (Original Equipment Manufacturer). Ein erfolgreicher Übergang zu CE erfordert daher die Einbindung der gesamten Lieferkette, da kein Akteur allein über die notwendigen Ressourcen und Fähigkeiten verfügt. (Amir et al., 2022, S. 2697; Batista et al., 2015, S. 2; Fehrer & Wieland, 2021, S. 616; Jean et al., 2012, S. 1026)

Ziel dieser Studie ist daher, Herausforderungen und Lösungen bei der Implementierung von CE bei Automobilzulieferern zu untersuchen. Damit soll ein umfassendes Verständnis für die praktische Umsetzung von CE vermittelt werden, um Anpassungsprozesse an CE zu unterstützen und zu fördern.

Im Fokus stehen dabei Zulieferer der Automobilzulieferkette, die Teile für OEMs fertigen. Rohmaterial-Zulieferer, OEM und Endnutzer des Fahrzeugs werden nicht untersucht.

Folgende Forschungsfragen werden adressiert:

1. *Welche Herausforderungen begegnen Zulieferer in der Automobilbranche bei der Implementierung von CE-Ansätzen?*
2. *Auf welche Lösungsansätze können Zulieferer zurückgreifen, um einen Übergang zu CE zu erleichtern?*

Die Studie entstand in einem Kooperationsprojekt zwischen dem Transformationsnetzwerk Nordschwarzwald (TraFoNetz) und dem Institut für Industrial Ecology (INEC) der Hochschule Pforzheim. (Lache, 2023; pm/gel, 2023; TraFoNetz, 2023) Sie ist eine Kurzfassung der Analyse von Anita Schallenberg (Schallenberg, 2024).

## 2 Circular Economy und die Automobilzulieferindustrie

### 2.1 Circular Economy: Einführung

Während der Begriff „Circular Economy“ für seinen Fokus auf Abfall und Recycling bekannt ist, umfasst CE darüber hinaus Faktoren wie zirkuläres Produktdesign, Lebensdauererlängerung, Aufarbeitung, Wiederverwendung von Komponenten und Materialien, gemeinsame Nutzung von Produkten, Förderung von Reparaturen etc. (European Commission, 2020c, S. 2; European Environment Agency, 2016, S. 9 ff.; Rudolph, 2018, S. 125 ff.; Saidani et al., 2018, S. 117; Weber & Stuchtey, 2019, S. 27) CE schafft wirtschaftliche Anreize und Finanzierungen, zirkuläre Geschäftsmodelle, Eco-Innovationen, passende Governance Ansätze, Fähigkeiten und Kenntnisse. (European Environment Agency, 2016, S. 9 ff.)

CE wird anhand 10R-Strategien umgesetzt. Diese sind in drei Überkategorien unterteilt. Zum Einen in intelligentere Nutzung und Herstellung von Produkten mit den Ansätzen „Refuse, Rethink, Reduce“. Zum anderen wird die Verlängerung der Lebensdauer durch die Ansätze „Reuse, Repair, Refurbish, Remanufacture und Repurpose“ aufgegriffen. Schließlich wird die nutzbringende Verwendung von Materialien durch die Ansätze „Recycle und Recover“ integriert. (European Commission, 2020a, S. 7 ff.; Potting et al., 2017, S. 15) Wenn einer dieser Ansätze erfüllt ist, wird dies als „CE-Ansatz“ bzw. „CE-fähig“ bezeichnet.

Die CE-Ansätze sind in Abbildung 1 dargestellt. Beim **Recycling** werden Abfallstoffe so aufarbeitet, dass daraus neue Produkte, Werkstoffe oder Materialien entstehen. (Europäisches Parlament und der Rat der Europäischen Union, 2008, S. 10) Beim **Remanufacturing (Wiederproduktion)** wird aus gebrauchten Produkten / Komponenten ein Produkt hergestellt, das mindestens die ursprüngliche Funktionalität und Leistung aufweist. Es gilt als neuwertig und mit einer gewerblichen Garantie versehen. (Deutsches Institut für Normung e.V., 2023, S. 9; Woidasky et al., 2025) Im **Refurbishment (Rekonditionierung)** wird ein Produkt modifiziert, um dessen Funktionalität oder Leistung zu verbessern oder wiederherzustellen. (Deutsches Institut für Normung e.V., 2023, S. 8) **Reuse (Wiederverwendung)** bezeichnet den Prozess, bei dem Produkte oder Komponenten, die nicht als Abfall gelten, wieder für ihren ursprünglich vorgesehenen Zweck genutzt werden. (Deutsches Institut für Normung e.V., 2023, S. 9) **Repair (Reparatur)** bezeichnet die Behebung von Mängeln oder Schäden an einem

Produkt, um es wieder in seinen ursprünglichen Zustand zu versetzen und so eine weitere Nutzung zu ermöglichen. (Deutsches Institut für Normung e.V., 2023, S. 9)

Der Schwerpunkt dieser Studie liegt auf **Recycling, Remanufacturing und Reparatur**, da Zulieferer darauf direkten Einfluss haben. Refurbishment wird meist von Drittanbietern durchgeführt, während Reuse meist durch Endnutzer oder Reparaturdienste erfolgt. (Nag et al., 2021, S. 5)

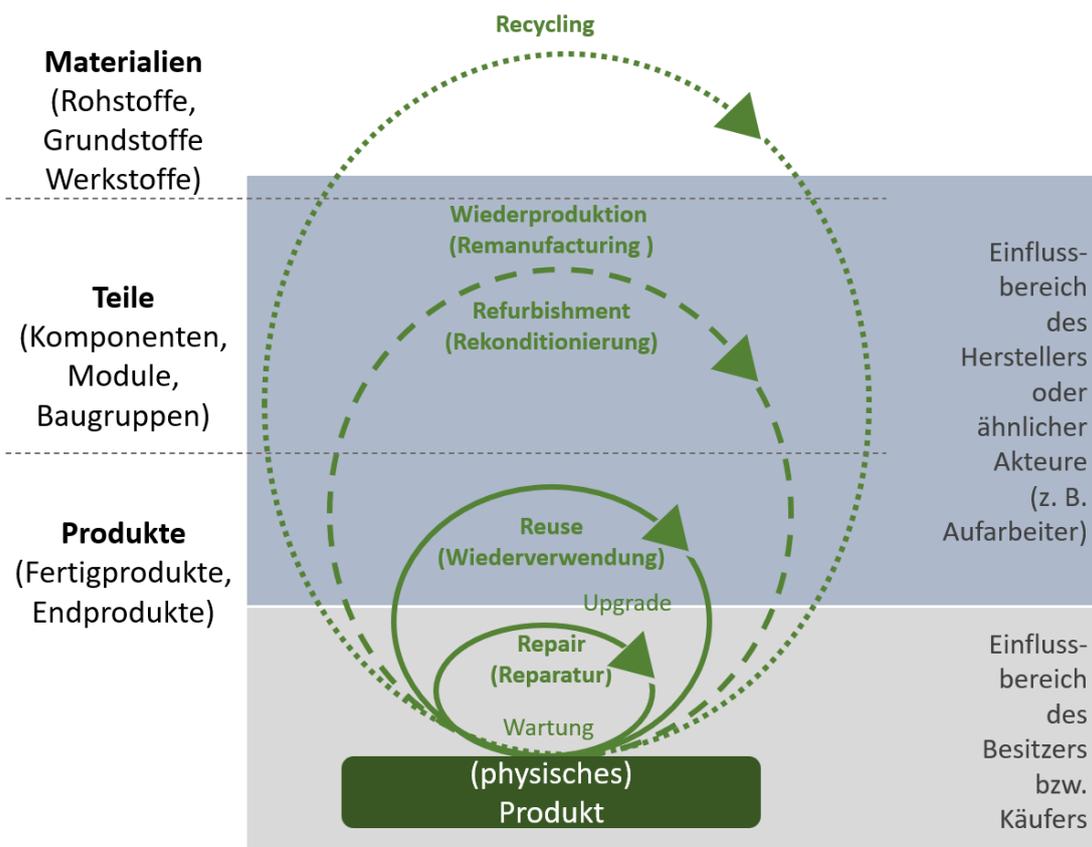


Abbildung 1: Ansätze zur Kreislaufführung auf Produkt- und Werkstoffebene  
adaptiert von (Woidasky et al., 2025)

## 2.2 Die Automobilzuliefererindustrie

Zulieferer sind um Unternehmen, die Produkte herstellen, die direkt in den Fertigungsprozess eines Fahrzeugs einfließen oder als Bestandteil eines Fahrzeugs dienen. Sie liefern ihre Produkte direkt oder indirekt an einen Automobilhersteller, der als OEM bezeichnet wird. (Mentz, 2006, S. 8) Zulieferer fertigen somit für industrielle Abnehmer, welche die Endprodukte fertigen. Ihre Produkte sind so konzipiert, dass sie erst im Fahrzeug ihre Funktion erfüllen können. (Fieten, 1991, S. 15)

Die Kategorisierung von Automobilzulieferern erfolgt gemäß den Stufen der Wertschöpfungskette:

- An erster Stelle steht der OEM, gefolgt von dessen unmittelbaren vorgelagerten Lieferanten in der ersten Ebene (Tier-1-Lieferant).
- Anschließend kommen die Lieferunternehmen der nachfolgenden Lieferebenen, die als Vor- und Sublieferanten benannt sind (Tier-2- und Tier-3-Lieferanten).

In der Praxis können Zulieferer oft mehrere Positionen innerhalb der Lieferkette gleichzeitig einnehmen. (Heigl & Rennhak, 2012, S. 8) Der Begriff „Zulieferer“ fokussiert sich in dieser Studie auf Zulieferer von Sachgütern für die OEMs (Zulieferer von Dienstleistungen, Maschinenbau oder Personaldienstleister und Rohstofflieferanten werden nicht betrachtet). Dabei werden die in Abbildung 2 dargestellten Begriffe verwendet.

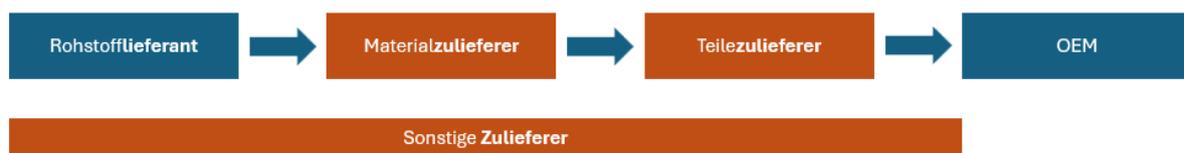


Abbildung 2: Festlegung Definitionen Zulieferer

Zentral sind dabei Material- und Teilezulieferer:

- **Materialzulieferer (MZ)** sind Zulieferer, die Zwischenteile herstellen. Diese Zwischenteile bestehen meist aus einem Material und sind nicht komplex aufgebaut. Ein Beispiel für einen MZ ist ein Hersteller von Bonddrähten.
- **Teilezulieferer (TZ)** verarbeiten die Zwischenteile weiter. Beispiel ist ein Hersteller von Klimaanlage. Dessen Teile werden entweder in ein weiteres System eingebaut oder direkt an den OEM geliefert (es wird hier nicht zwischen Teilen und Systemen unterschieden).

In dieser Studie ist somit „der Kunde“ nicht der Endkunde des Automobils, sondern ein nachgelagerter Zulieferer oder der OEM.

### 2.3 Automobillebenszyklus und zirkuläre Betrachtung

Der Produktlebenszyklus von den Rohstoffen bis ins End-of-Life (EOL) und mögliche Kreislaufschließungen sind in Abbildung 3 dargestellt. Zu Beginn stehen die Rohstofflieferanten, die Rohmaterialien für die Herstellung von Automobilteilen liefern. Diese

Materialien werden an MZ weitergegeben, die sie zu Zwischenprodukten oder Bauteilen verarbeiten. Diese werden dann an TZ weitergegeben, die die Endbauteile fertigen und an den OEM liefern. Der OEM stellt das fertige Automobil her und übergibt es dem Endnutzer. Während der Nutzungsphase wird das Automobil verwendet und kann bei Bedarf repariert werden. Ausgediente Teile werden ausgetauscht und zumeist direkt an den Reparaturbetrieb zurückgegeben. Erreicht das Fahrzeug das Ende seiner Lebensdauer als „End-of-Life Vehicle“ (ELV), wird es im Idealfall zum Demontagebetrieb gebracht. Dieser zerlegt das Fahrzeug und entnimmt verwertbare oder umweltgefährdende Teile. Ausgewählte Teile wie Reifen, Felgen und Motoren werden gehandelt oder recycelt. Darüber hinaus werden Teile oder Fahrzeuge im Ausland weiterverwendet. (Alamerew & Brissaud, 2020, S. 4; Kalverkamp & Raabe, 2017, S. 118; Kus et al., 2019, S. 1040; Sharma & Pandey, 2020, S. 5)

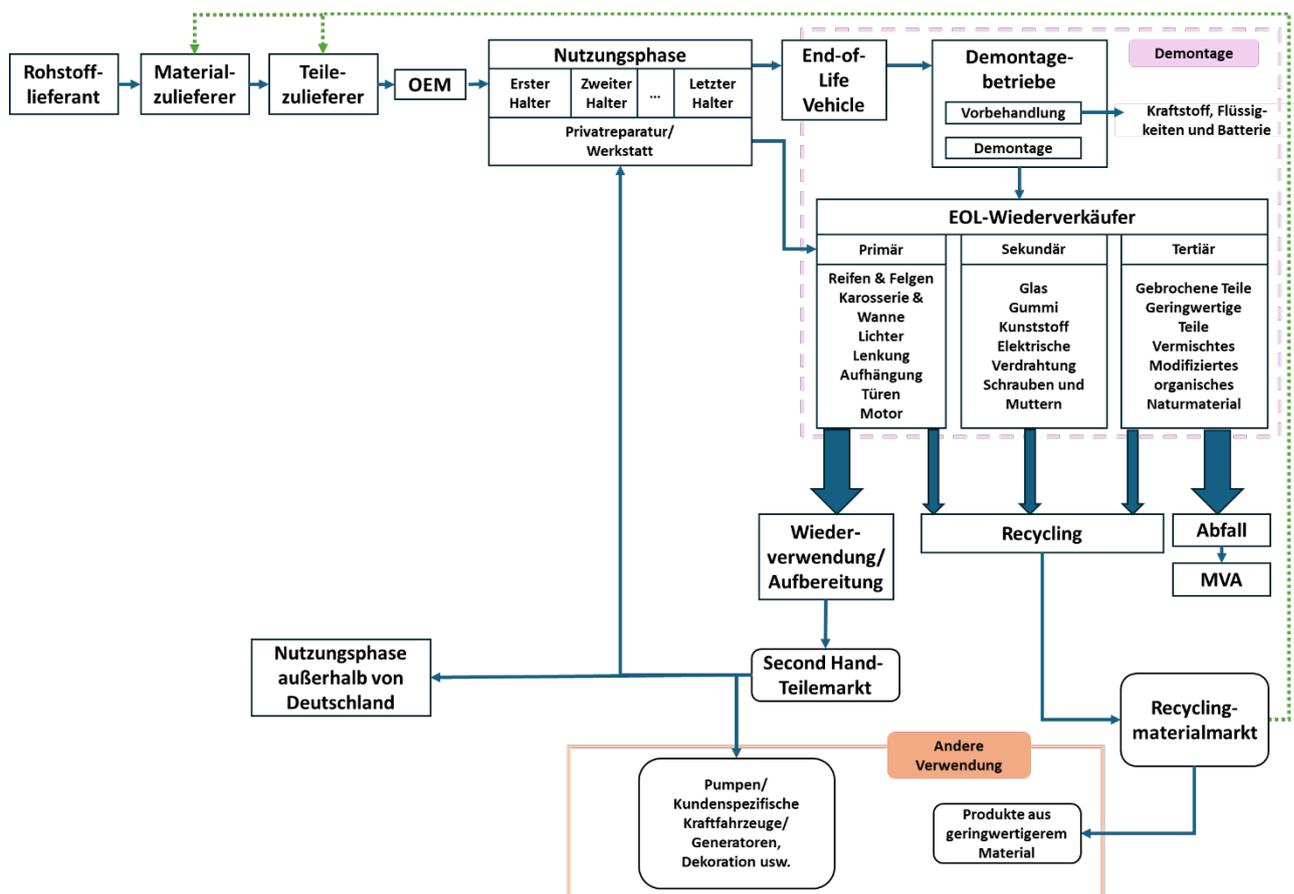


Abbildung 3: Automobilindustrie: Lieferkette, Demontage und Recyclingwege  
 adaptiert von Alamerew & Brissaud, 2020, S. 4; Kalverkamp & Raabe, 2017, S. 118; Kus et al., 2019, S. 1040; Sharma & Pandey, 2020, S. 5

## **2.4 Vorteile der Umsetzung von CE bei Zulieferern**

Warum sollte CE für Zulieferer interessant sein? Die Rückführung von Abfällen als hochwertige Sekundärrohstoffe kann Kosten reduzieren und die Abhängigkeit von Primärrohstoffen verringern. So können Versorgungssicherheit erhöht und Risiken minimiert werden. Die Umstellung auf CE reduziert den Verbrauch natürlicher Ressourcen, da Materialien wiederverwendet oder recycelt werden. (acatech et al., 2021, S. 22; Agrawal et al., 2021, S. 1053 f.; European Environment Agency, 2016, S. 12; Yu et al., 2022, S. 800)

Besonders durch die Ausschöpfung von Innovationspotenzialen können Zulieferer ihre Marktposition stärken, Profitabilität steigern, Kunden zusätzlichen Nutzen bieten oder sogar neue Geschäftsfelder erschließen. Ihr Ansehen in der Öffentlichkeit wird verbessert, da sie sich durch nachhaltige Praktiken als umweltbewusst und verantwortungsvoll positionieren können. (acatech et al., 2021, S. 22; Agrawal et al., 2021, S. 1053 f.; European Environment Agency, 2016, S. 12; Yu et al., 2022, S. 800)

### 3 Methodik der Studie

Die Forschungsfragen wurden mit einem Methodenmix aus Desk Research und empirischer Forschung adressiert:

Zunächst wurden zwei systematische Literaturrecherchen (SLR) durchgeführt (Denyer und Tranfield 2009), dabei wurden Artikel aus dem Zeitraum von 2016 bis 2024 betrachtet. In dem systematischen Such- und Auswahlprozess wurden 39 Publikationen ausgewählt, die danach strukturiert ausgewertet wurden.

Interviews mit Experten aus Zulieferunternehmen: Es wurden 16 Expert\*innen für ein Interview gewonnen (14 aus Deutschland und je einer aus Österreich und der Schweiz). Die darüber abgedeckten Zulieferteile eines Automobils sind in Abbildung 4 dargestellt, die befragten Unternehmen in Tabelle 1 (anonymisiert) aufgelistet.

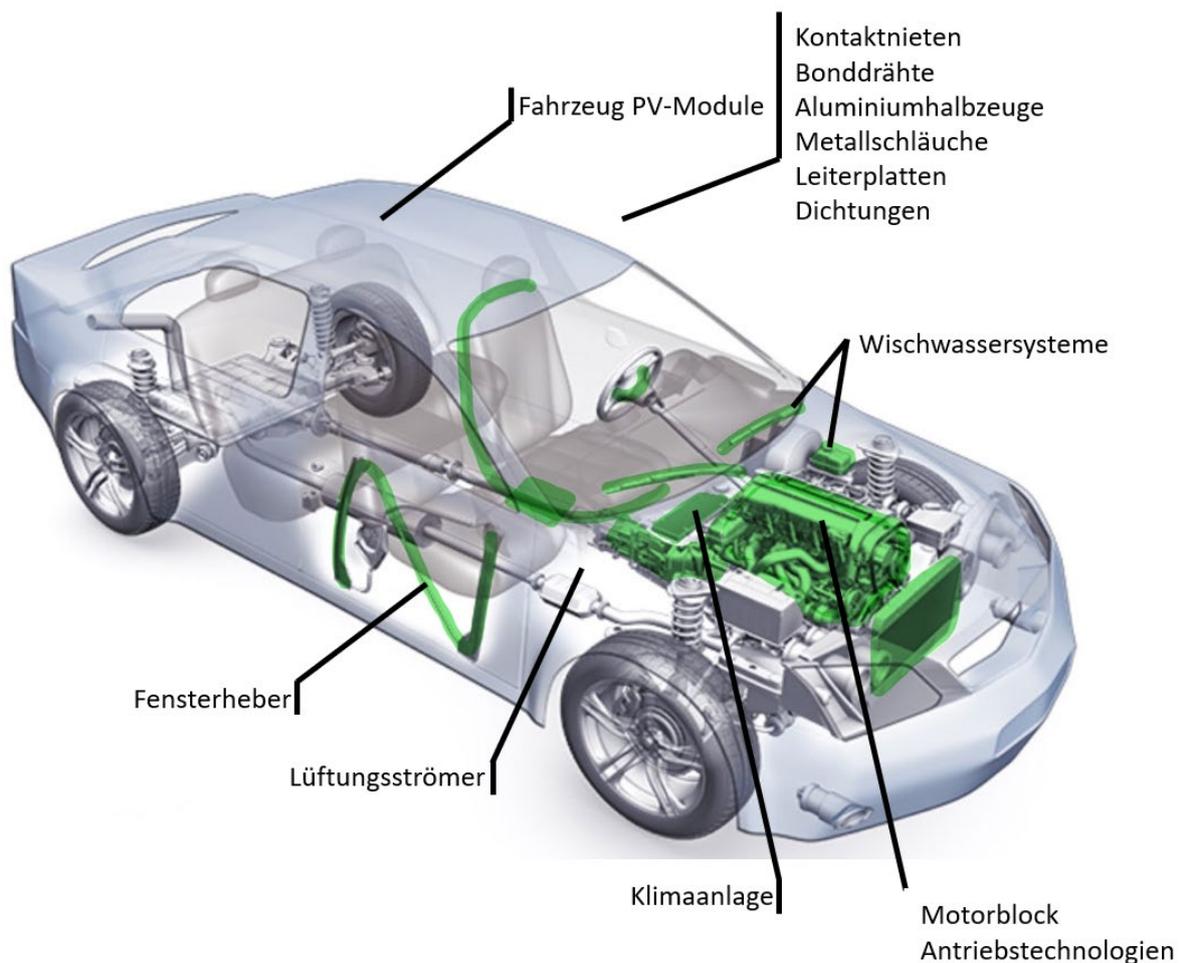


Abbildung 4: Durch Interviews abgedeckte Zulieferteile adaptiert von AAMPACT e.V., 2024

Tabelle 1: Über Experteninterviews befragte Automobilzulieferer (MZ: Materialzulieferer, TZ: Teilezulieferer, SZ: sonstige Zulieferer)

Nr.	Anonymisiert	Produkte	Position	Mitarbeiter weltweit	Hauptsitz
1.	MZ 1	Kontaktnieten	Assistent der Geschäftsleitung	25	Deutschland
2.	MZ 2	Bonddrähte	Leiter Nachhaltigkeit	15.000	Deutschland
3.	MZ 3	Aluminiumhalbzeuge	Nachhaltigkeitsmanager	3.000	Österreich
4.	MZ 4	Motorblock	Material, Qualität und Umwelt	1.500	Deutschland
5.	TZ 1	Klimaanlage	Nachhaltigkeitskoordinator	11.000	Deutschland
6.	TZ 2	Fensterheber	Leiter Nachhaltigkeit	32.000	Deutschland
7.	TZ 3	Metallschläuche	Leitung Innovationsmanagement	4.500	Deutschland
8.	TZ 4	Fahrzeug PV-Module	Vertriebsingenieur Maschinenbau	K.A.	Deutschland
9.	TZ 5	Leiterplatten	Leitung Betrieb	1.800	Deutschland
10.	TZ 6	Wischwassersysteme	Nachhaltigkeitsmanager	5.000	Deutschland
11.	TZ 7	Lüftungsströmer	Bereichsleiter Nachhaltigkeit	5.000	Deutschland
12.	TZ 8	Antriebstechnologien	Leitung Technologie Management	23.000	Deutschland
13.	TZ 9	Dichtungen	Nachhaltigkeitsmanager	8.000	Schweiz
14.	SZ 1	Wiederaufbereiter	Leitung Vertrieb/Projektmanagement	100	Deutschland
15.	SZ 2	Autoverwertung	Geschäftsführung	10	Deutschland
16.	SZ 3	Auto-ID-Lösungen	Manager für strategische Allianzen	20	Deutschland

Zu den von den befragten Unternehmen verwendeten Materialien ergibt sich folgendes Bild: Die interviewten MZ hatten einen starken Fokus auf Metalle, insbesondere Edelstahl, Eisen, Aluminium und Kupfer. Bei den TZ ist die Materialvielfalt innerhalb eines Zulieferteils wesentlich größer. Neben Metallen verwenden sie verschiedene Kunststoffe, darunter faserverstärkte Kunststoffe wie Glasfaser, sowie Halbmetalle wie bspw. Silizium.

## 4 Ergebnisse

Relevante Circular-Economy-Aspekte in der Automobilzulieferindustrie wurden gemäß des in Abbildung 5 dargestellten Schemas strukturiert:

Innerhalb des direkten Handlungsspielraums der Zulieferer liegen Produktdesign, Material- und Rezyklatauswahl, Mitarbeiterkenntnisse, Technologien und Verfahren, Strategien und Prozesse, Messbarkeit und Instrumente, die betriebswirtschaftliche Perspektive sowie die Produktionsstätte (dargestellt innerhalb des Kastens in der Abbildung 5). Zulieferer können als Teil der Lieferkette auch auf die Lieferkette und Kooperationen Einfluss nehmen. Darüber können Möglichkeiten Gestaltung des EOL genutzt werden, um Kreisläufe zu schließen. Der rechtliche Rahmen beeinflusst die gesamte Automobilbranche und wirkt sich auf alle Bereiche aus.

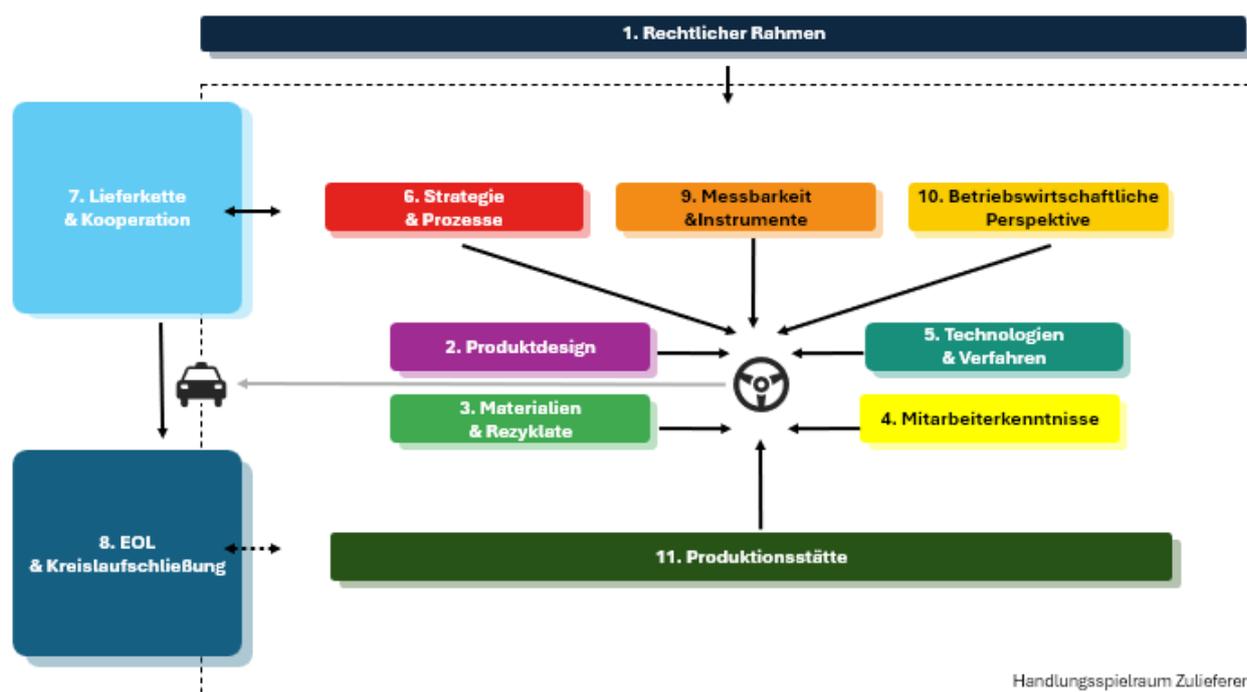


Abbildung 5: Analyseschema der SLRs und Interviews

### 4.1 Ergebnisse der Literaturanalyse

Die Analyse der wissenschaftlichen Literatur zeigt folgende Aspekte beim möglichen Umgang von Automobilzulieferern mit dem Thema CE:

Ein zentraler Aspekt bei der Implementierung der CE durch Zulieferer ist das **Produktdesign**. Zukünftige Produkte sind oft so gestaltet werden, dass deren Demontage, Recycling oder Wiederaufbereitung schwierig ist. CE wird bislang als separate Maßnahme betrachtet, nicht als integraler Bestandteil des Designs. Designideen werden

nicht aus der Perspektive der Demontage und des Remanufacturing entwickelt, so dass Zulieferteile für zukünftiges Recycling oder Wiederverwendung oft nicht geeignet sind. Dies würde Bauweisen mit leicht lösbaren Verbindungen, reversiblen Klebstoffen, nicht-destruktiver Demontage sowie modularen Designs und der Standardisierung von Zulieferteilen erfordern.

Die **Einbindung der Kunden** in den Innovations- und Designprozess von CE-Produkten ist entscheidend. Ein digitaler Produktpass kann dabei helfen, indem er Informationen zu Materialien, Aufbau und Demontagemöglichkeiten bereitstellt, die für alle in der Lieferkette zugänglich sind. Eine Dematerialisierungsstrategie sollte verfolgt werden, gefolgt von der Nutzung von Sekundärmaterialien. Es ist wichtig, verschiedene Materialien nicht zu vermischen, um hochwertiges Recycling ohne „Downcycling“ zu ermöglichen. Biobasierte Materialien könnten ebenfalls in Betracht gezogen werden.

Die **Nutzungsphase der Produkte** muss angepasst werden, um die Lebensdauer der Zulieferteile zu verlängern. Eine modulare Konstruktion erleichtert Produkt-Upgrades, Überholungen, Wiederaufbereitungen und Recyclingprozesse. Die Vielfalt der Produktvariationen sollte reduziert und eine längere Haltbarkeit gewährleistet werden und Ansätze gesucht werden, um Belastungen und Verschmutzungen in der Nutzungsphase weiter zu kompensieren. Anreize für die Rückgabe von Zulieferteilen sollten angeboten werden. Allerdings muss erwähnt werden, dass viele Teile nicht wiederverwendet werden können.

Mitarbeiter benötigen fundierte **Kompetenzen** im Bereich CE und sollten entsprechend geschult werden. Neue Technologien und Verfahren, wie abfallärmere additive Fertigungstechniken, werden vorgeschlagen.

Geeignete **IT-Lösungen**, beispielsweise für digitale Zwillinge oder die Teilnahme an Produktnetzwerken wie Catena-X (Catena X Automotive Network e.V., 2024), sind ebenfalls notwendig.

**Kooperationen innerhalb der Lieferkette** sind von großer Bedeutung, und in diesen Netzwerken sollten auch die EOL-Beteiligten einbezogen werden, um die Transparenz der Lieferkettenaktivitäten durch mehr Digitalisierung und Schnittstellenfähigkeit der Systeme zu verbessern. Die Original Equipment Manufacturer (OEM) als Kunden der Zulieferer sollten in den Innovations- und Designprozess einbezogen werden, um gemeinsam CE-Ideen zu entwickeln.

CE muss in die Unternehmensstrategie und -prozesse integriert werden: Die **Strategie** muss CE beinhalten, und die Führungsebene sollte die Implementierung proaktiv

unterstützen, beispielsweise durch geeignete Anreizsysteme. Auch ist die Messbarkeit von CE für die Entscheidungsfindung sicherzustellen.

Weiterhin wurde die Integration der Wiederaufbereitung bei Zulieferern als neuer Geschäftszweig vorgeschlagen.

Um eine Kreislaufschließung innerhalb der Lieferkette zu erreichen, sollte mehr **kooperiert** werden, einschließlich der Zusammenarbeit mit Akteuren am End-of-Life (EOL). Die Zusammenarbeit gewährleistet einen gleichberechtigten Zugang zu Informationen. Für eine verbesserte Transparenz sollten Lieferkettenaktivitäten weiter digitalisiert werden.

**Rechtliche Rahmenbedingungen** werden oft als problematisch wahrgenommen, jedoch keine konkreten Lösungsvorschläge gemacht.

Schließlich sollten **Produktionsstätten** nachhaltig gestaltet werden, beispielsweise durch den Einsatz erneuerbarer Energien und den regionalen Bezug von Rohstoffen.

## 4.2 Ergebnisse der Interviews: Herausforderungen

Die von den befragten Zulieferern genannten Herausforderungen sind in Abbildung 6 dargestellt. Zentrale Aspekte davon werden im Folgenden beschrieben.

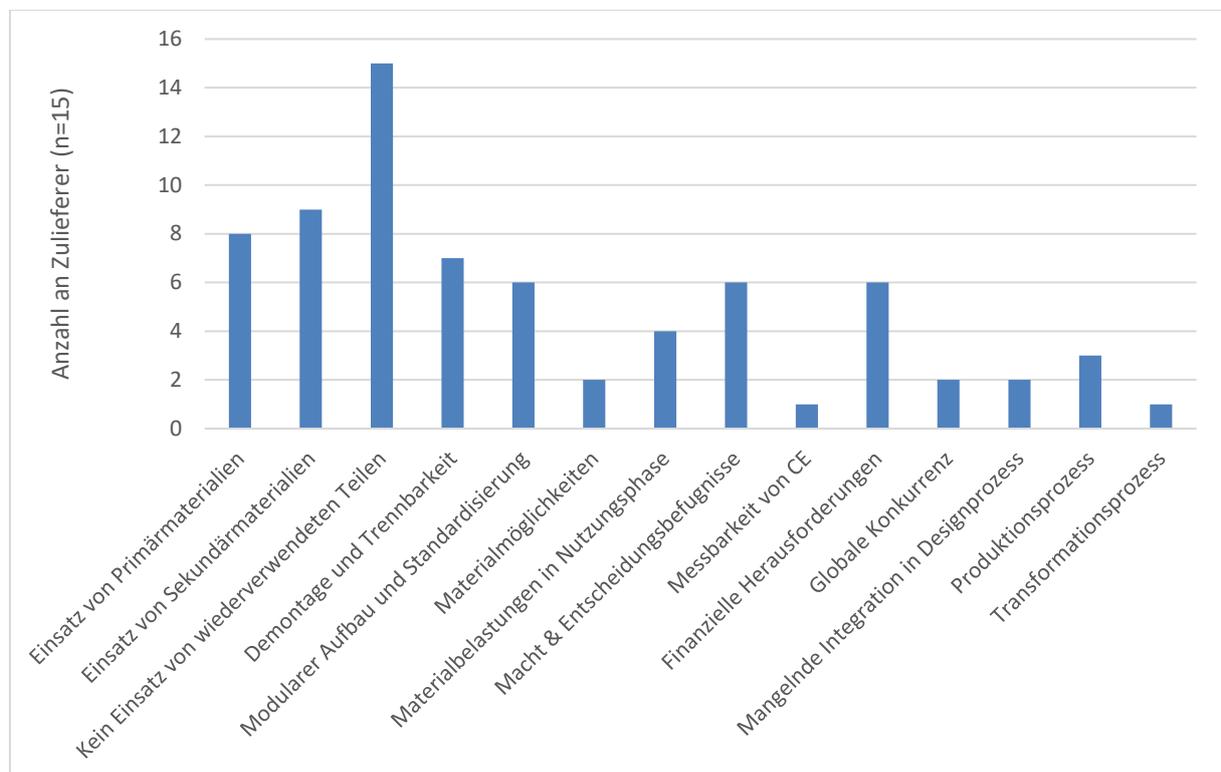


Abbildung 6: Herausforderungen, CE umzusetzen (aus Interviews)

#### 4.2.1 Herausforderungen Primär- vs. Sekundärmaterialien

Im Allgemeinen sind Zulieferteile auf eine Lebensdauer von etwa 15 Jahren ausgelegt, manche Teile sogar für einen längeren Zeitraum. Während dieser Zeit müssen Sicherheit und Qualität gewährleistet sein. Die Entwicklung neuer Modelle in der Automobilzuliefererbranche ist ein kontinuierlicher Prozess mit variierenden Entwicklungszyklen je Zulieferer. Komplette Neuentwicklungen von Zulieferteilen dauern zum Teil mehrere Jahre. Von den befragten Zulieferern wurden Entwicklungszeiten von 5-10 Jahre genannt. Mit zunehmender Materialvielfalt steigt die Komplexität des Produktes und CE-Herausforderungen, da die Anforderungen und verschiedenen Materialeigenschaften mehr Aufwand und spezielle Lösungen erfordern. Traditionell werden in der Automobilindustrie insbesondere Primärmaterialien genutzt. Von den befragten Unternehmen verwenden jedoch einige auch Sekundärmaterialien (insbesondere Metalle).

Abbildung 7 zeigt Herausforderungen, die mit einer potenziellen Nutzung von Sekundärmaterialien verbunden sind. Qualität und Sortenreinheit, Intransparenz, technische und sicherheitsbezogene Aspekte sowie Verfügbarkeit wurden häufig genannt, darauf folgend regulatorische Vorschriften und wirtschaftliche Aspekte.

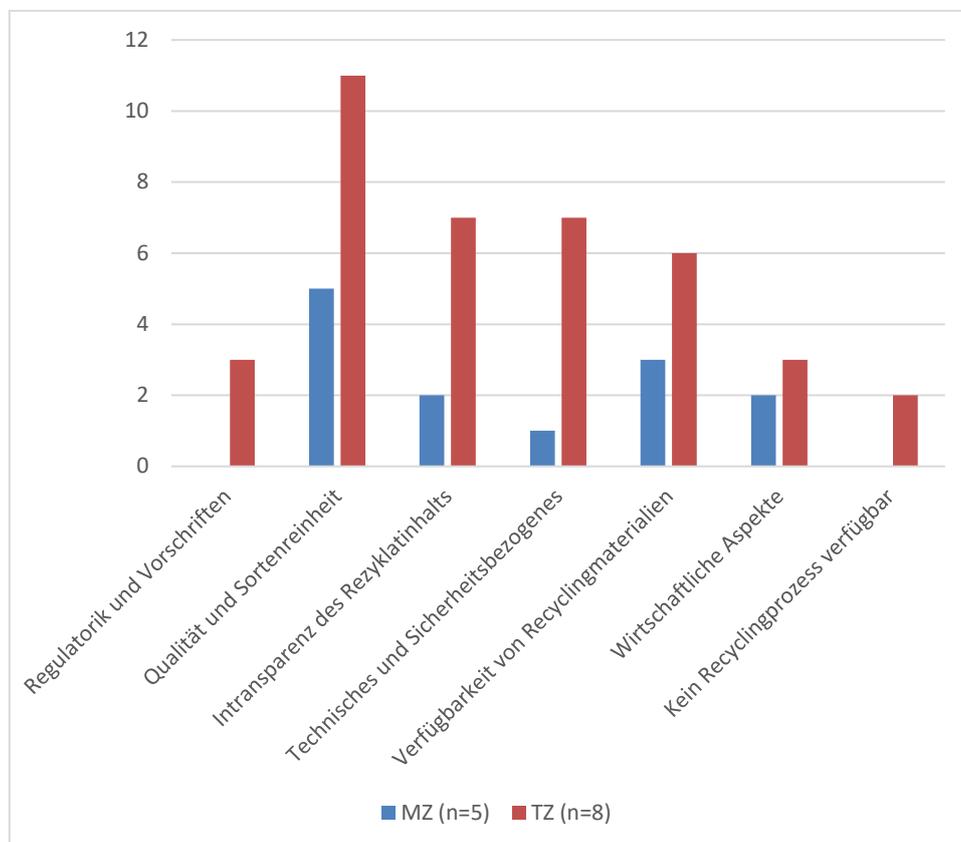


Abbildung 7: Herausforderungen beim Einsatz von Sekundärmaterialien

Die größten Herausforderungen bei der Verwendung von Sekundärmaterialien liegen in deren **Qualität und Sortenreinheit**, da diese erhebliche Zusatzaufwände erfordern, um die für die Automobilindustrie notwendigen Standards zu erfüllen. Recyclingmaterial ist nur begrenzt verfügbar, da es nur wenige Anbieter gibt, die die geforderte Menge an Regranulat in entsprechender Qualität liefern können. Auch können die Anforderungen an Produktqualität und spezifische Eigenschaften für das Zulieferteil nicht vollständig mit recyceltem Material erfüllt werden.

**Technische und sicherheitsbezogene Aspekte** stellen eine erhebliche Herausforderung bei der Verwendung von Sekundärmaterialien im Automobilsektor dar. Die Anforderungen an Materialeigenschaften und -qualität sind hoch, da die Sicherheit der Fahrzeuginsassen oberste Priorität hat. Dies gilt insbesondere für systemkritische Komponenten wie Bremssysteme oder Teile zur Emissionsreduktion. Insgesamt zeigt sich die Notwendigkeit, Primärmaterialien für sicherheitsrelevante Bauteile zu verwenden, um die hohen Standards und Normen der Branche zu erfüllen. So können Verunreinigungen in recycelten Materialien zu Problemen führen, da sie die Materialeigenschaften negativ beeinflussen und somit deren Einsatz in sicherheitsrelevanten Anwendungen unmöglich machen.

Ein weiterer wichtiger Punkt ist die **Intransparenz über die genaue Zusammensetzung von Rezyklaten**. Ohne genaue Kenntnisse über die enthaltenen Stoffe und ihre Mengen können Sekundärmaterialien nicht bedenkenlos in sicherheitskritischen Bereichen eingesetzt werden. Dies führt dazu, dass die Automobilhersteller und deren Zulieferer sich häufig für Primärmaterialien entscheiden, um die Sicherheit und Zuverlässigkeit ihrer Produkte zu gewährleisten.

Eine **begrenzte Verfügbarkeit von Recyclingmaterialien** erschwert den Einsatz von Sekundärmaterialien und macht eine zuverlässige Beschaffung und Verarbeitung oft unmöglich.

Oftmals stehen nicht genügend Mengen von Recyclingmaterialien, insbesondere in der erforderlichen Qualität am Markt zur Verfügung, um den Bedarf der Zulieferer zu decken. Manche Materialien sind schwer zu recyceln, weswegen noch kein geschlossener Kreislauf für sie existiert. Der Großteil der benötigten Materialien muss daher immer noch aus Primärquellen bezogen werden, da die weltweiten Recyclingkapazitäten nicht ausreichen, um den Bedarf zu decken.

Ein häufiges Problem mit **regulatorischen Aspekten** ist, dass bestimmte Inhaltsstoffe und Materialien, wie beispielsweise Flammenschutzmittel, gemäß der EU-

Chemikalienverordnung REACH nicht wiederverwendet werden dürfen. Dies schränkt die Möglichkeiten ein, solche Materialien in den Recyclingstrom einzuführen und erfordert aufwendige Prozesse wie beispielsweise die Pyrolyse, um sie wieder einsetzen zu können. (Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union, 2023)

Zuletzt fließen auch **wirtschaftliche Aspekte** ein. Eine wesentliche Herausforderung besteht darin, dass Primärmaterialien oft günstiger auf dem Markt verfügbar sind im Vergleich zu Sekundärmaterialien. Daher wird auch aus Kostengründen oft auf Primärmaterialien zurückgegriffen.

#### 4.2.2 Herausforderungen wiederverwendete Zulieferteile

Die Rückmeldungen aus den Interviews zeigen, dass der Einsatz von wiederverwendeten Teilen in der Produktion von Neuteilen bei Zulieferern derzeit nicht realisierbar zu sein scheint. Keiner der befragten Zulieferer nutzt wiederverwendete Teile. Die Hauptgründe hierfür liegen in den strengen Anforderungen an Sicherheitsbauteile und den daraus resultierenden hohen Qualitätsstandards für Materialien aus dem Recyclingprozess, die ihren Einsatz stark einschränken oder nahezu unmöglich machen (siehe Abbildung 8).

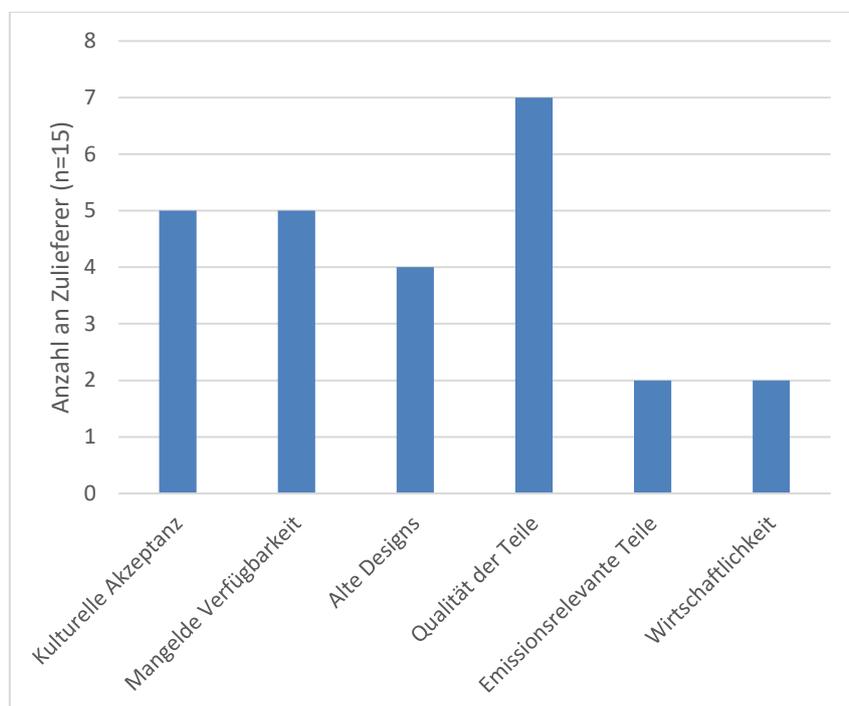


Abbildung 8: Gründe für keine Verwendung wiederverwendeter Teile (aus Interviews)

Ein weiteres Hindernis liegt in den technologischen und **design**bezogenen Aspekten der rückgewonnenen Teile. Diese beruhen auf Designs, die mittlerweile nicht mehr aktuell sind und können deshalb oft nicht mehr verwendet werden. Auch wurde die kulturelle Akzeptanz als Herausforderung genannt: Nach der üblichen Nutzungsdauer von etwa 15 Jahren besteht oft wenig Interesse daran, gebrauchte Teile erneut zu verwenden (sowohl seitens der OEMs, als auch seitens der potenziellen Endkunden).

#### **4.2.3 Herausforderungen EOL und Kreislaufschließung**

**Wenige Zulieferer möchten als Remanufacturer** auftreten, da die Wiederaufbereitung als Gesamtkonzept in der Automobilbranche oft als nicht sinnvoll oder unerwünscht angesehen wird. Nur zwei von zehn Zulieferern könnten sich vorstellen, als Remanufacturer am Markt aufzutreten, während acht von zehn dies ablehnen. Vier Zulieferer finden diese Idee interessant, von einer Umsetzung sind diese aber weit entfernt. Hier zeichnet sich deutlich ab, dass die MZ kein Interesse daran haben. Eine Rückführung mache keinen Sinn. Es wird daher eher der Weg des klassischen Recyclings bevorzugt, statt Wiederaufbereitung. Die logistischen Herausforderungen sind erheblich, da Teile aus Gesamtfahrzeugen extrahiert und spezifischen Zulieferern zurückgeführt werden müssten, was ohne eine koordinierte Industrieanstrengung kaum umsetzbar ist und als nicht nur europäische, sondern globale Herausforderung der Branche gilt. Darüber hinaus erfordert Remanufacturing erhebliche Investitionen in neue Prozesse, Fachkräfte und Infrastruktur. Der Bedarf sei aktuell nicht vorhanden und die Gewinnaussichten gering. Dies steht im Widerspruch zu aktuell schon bestehenden Remanufacturing-Aktivitäten von Unternehmen wie ZF oder Bosch.

#### **4.2.4 Herausforderungen Produktverwertung EOL**

Das Wissen der Zulieferer über den Verbleib ihrer Produkte am Ende des Lebenszyklus ist begrenzt. Die meisten Zulieferer haben keine Transparenz darüber, was mit ihren Produkten nach dem Verkauf und Einbau in Fahrzeuge geschieht. Dies unterstreicht die Tatsache, dass das EOL derzeit von den Zulieferern nicht ausreichend berücksichtigt wird. Ihre Überlegungen und Designentscheidungen enden oftmals mit dem Verkauf des Zulieferteils an den Kunden. Viele Zulieferer gehen davon aus, dass ihre Produkte mechanisch recycelt werden. Und in der Tat werden Metalle in der Regel mechanisch recycelt, während Verbundstoffe und Kunststoffe aus technischen Teilen

häufig thermisch verwertet werden. Schrottplätze bieten zwar Ersatzteile für Werkstätten und Privatpersonen an, aber nur in begrenztem Umfang und nur dann, wenn es wirtschaftlich rentabel ist. Auslandsexporte sind in der Branche üblich, wodurch die Teile dem heimischen Recyclingkreislauf entzogen werden.

Ein zentrales Problem ist die **Materialidentifikation** bei der Entsorgung, worauf Zulieferer indirekt Einfluss nehmen können, da ihre Produkte im Entsorgungssystem landen. Autoverwerter können oft nicht erkennen, aus welchen Werkstoffen die Bauteile bestehen oder von welchem Lieferanten sie stammen. Ein weiteres Problem ist die mangelnde Information über die Werkstoffe, die von außen nicht erkennbar ist.

#### **4.2.5 Herausforderungen Kommunikation und Instrumente**

Die durchgeführten Interviews zeigten, dass eine effektive Umsetzung der CE stark davon abhängt, wie gut sich die Beteiligten austauschen und zusammenarbeiten. In der Praxis stellt sich heraus, dass CE in der Kommunikation innerhalb der Lieferkette kaum eine Rolle spielt. Sowohl MZ- als auch TZ berichteten übereinstimmend, dass CE-Konzepte selten weitergegeben oder von den Kunden nachgefragt werden. Es fehlt an einem gemeinsamen Ansatz, um CE transparent in der Lieferkette aufzuzeigen und zu kommunizieren.

#### **4.2.6 Zwischenfazit zu Herausforderungen aus Interviews**

Die Automobilzulieferindustrie steht vor erheblichen Herausforderungen bei der Implementierung der CE, insbesondere hinsichtlich der Verwendung von Sekundärmaterialien. Primärmaterialien sind traditionell dominierend, da sie den hohen Qualitäts- und Sicherheitsstandards der Branche entsprechen. Die Nutzung von Sekundärmaterialien, wie recycelten Metallen, ist durch Herausforderungen wie Qualität, Sortenreinheit und Verfügbarkeit begrenzt. Diese Materialien müssen strenge Anforderungen erfüllen, um die Sicherheit in kritischen Fahrzeugkomponenten zu gewährleisten. Die Intransparenz der Zusammensetzung von Rezyklaten und regulatorische Einschränkungen, wie durch die EU-Chemikalienverordnung REACH, verkomplizieren den Einsatz von recycelten Materialien zusätzlich. Wirtschaftliche Aspekte spielen ebenfalls eine Rolle, da Primärmaterialien oft kostengünstiger sind.

Die Wiederverwendung von Zulieferteilen ist derzeit nicht realisierbar, da strenge Sicherheits- und Qualitätsanforderungen dies stark einschränken. Technologische und

designbezogene Hindernisse, sowie kulturelle Akzeptanzprobleme, erschweren die Integration von gebrauchten Teilen in neue Produkte. Auch die Kreislaufschließung am EOL ist eine Herausforderung. Die Zulieferer haben begrenzte Informationen über den Verbleib ihrer Produkte nach der Nutzung und die Rückführung von Materialien wird als ineffizient angesehen. Logistische und finanzielle Hürden machen es schwierig, eine koordinierte Wiederaufbereitung zu implementieren.

Schließlich ist die Kommunikation innerhalb der Lieferkette ein kritischer Punkt. Die Konzepte der CE werden selten weitergegeben oder nachgefragt, was eine effektive Umsetzung behindert. Es fehlt an einem gemeinsamen Ansatz, um die Prinzipien CE transparent zu kommunizieren und zu integrieren. Dies zeigt, dass die Industrie einen erheblichen Wandel in der Kooperation und Kommunikation benötigt, um die Ziele der CE zu erreichen.

### 4.3 Ergebnisse der Interviews: Lösungen

Die Umsetzung der CE in der Automobilzulieferindustrie wird von verschiedenen Faktoren beeinflusst, die über rein ökologische Aspekte hinausgehen.

Tabelle 2 gibt einen Überblick über zentrale Treiber, die sowohl externe Anforderungen als auch unternehmensinterne Motive umfassen und verdeutlicht, warum CE zunehmend an strategischer Bedeutung gewinnt.

Tabelle 2: Treiber der CE in der Automobilzulieferindustrie (aus Interviews)

Treiber	Erläuterung
Finanzielle Treiber	Finanzielle Vorteile durch Kosteneffizienz und „grüne Finanzierung“. Banken und Investoren bewerten Produkte zunehmend anhand ihres ökologischen Wertes.
Marktbezogene Treiber	Kunden und OEM fordern verstärkt CE, verbunden mit ambitionierten Zielen.
Regulatorische Treiber	Politische Rahmenbedingungen wie CO <sub>2</sub> -Reduzierungsvorschriften, CSRD, Circular Economy Action Plan, die EU-Altauto-Richtlinie und REACH fördern die Einhaltung von Umweltstandards.
Rohstoffsicherung	Besonders TZ betonen die strategische Bedeutung der Rohstoffsicherung (z.B. Halbleiter, Primärkunststoffe). MZ sehen dies als weniger kritisch an.
Interne Treiber	TZ richten Ziele und Strukturen häufiger auf Nachhaltigkeit aus, während dies bei MZ seltener ist.
Imageverbesserung	CE kann das Unternehmensimage durch Kommunikation von grünen Maßnahmen stärken.

Mögliche Lösungswege für die Implementierung von CE sind in Abbildung 9 dargestellt. Am häufigsten genannt wurden Maßnahmen zur Verlängerung der Produktlebensdauer, Standardisierung und Modularität, interne Rückführung von Materialien, sowie die Entwicklung von Kompetenzen und eine intensive Kundenberatung. Weitere wichtige Aspekte umfassen die Integration von CE-Prinzipien in den Entwicklungs- und Designprozess und Materialinnovationen. Zusätzlich wurden Lösungen wie Materialvereinheitlichung, Qualitätskontrollen, Simulation und Tests, Demontagemöglichkeiten, die Erschließung neuer Geschäftsfelder, Kooperationen und Sensibilisierung innerhalb der Branche sowie nachhaltige Produktionsmethoden genannt.

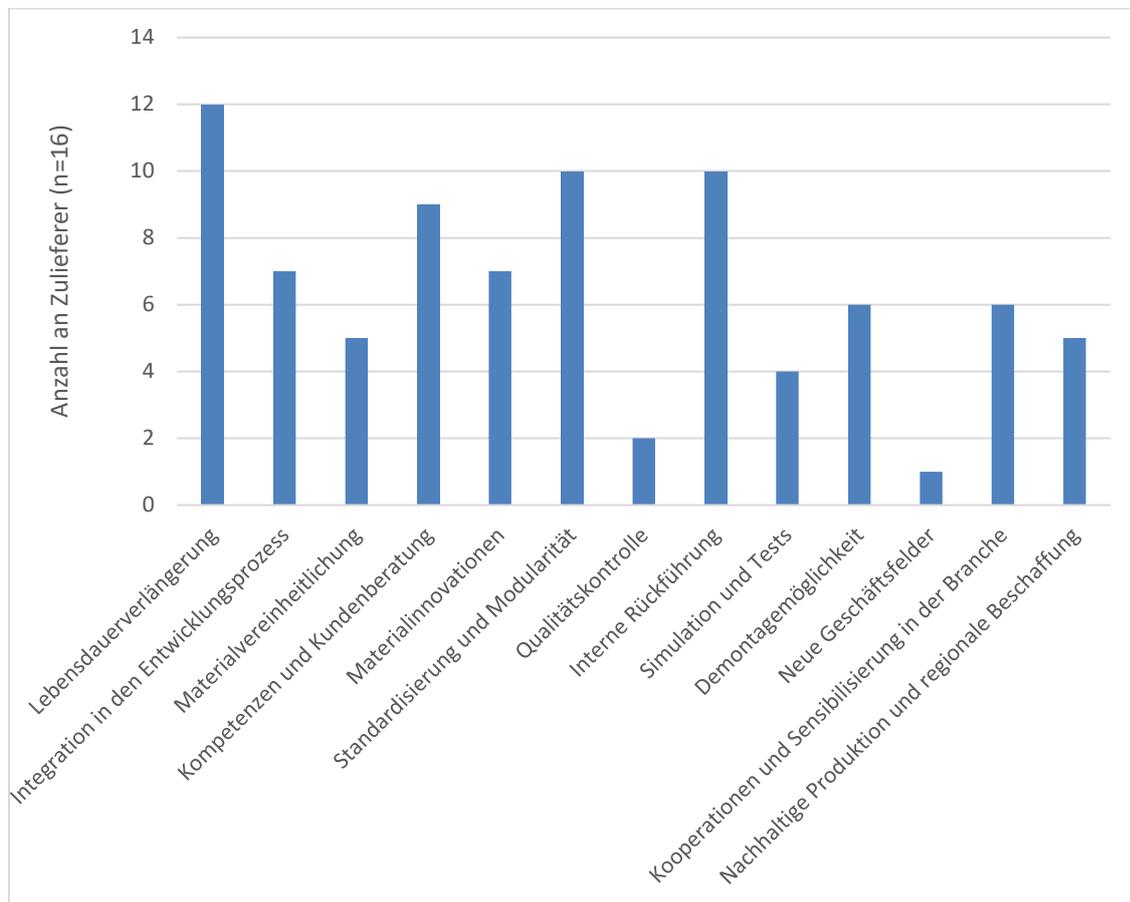


Abbildung 9: Lösungen zur CE-Implementierung (aus Interviews)

Im Folgenden werden die wichtigsten Lösungsvorschläge vorgestellt (die vollständige Beschreibung findet sich in Schallenberg, 2024).

### 4.3.1 Lösungen Lebensdauererlängerung

Die Ansätze zur **Lebensdauererlängerung** sind sehr vielfältig und wurden daher unterteilt in die Themenbereiche überdurchschnittliche Haltbarkeit, hohe Qualitätsstandards, langlebige Materialien, Echtzeitüberwachung und vorausschauende Wartung, Sicherstellung und Angebot von Reparaturmöglichkeiten sowie optimale Nutzung während der Nutzungsphase. Bei all dem sticht die Auswahl von langlebigen Materialien heraus. Es muss betont werden, dass die aktuellen Zulieferteile bereits für eine Lebensdauer von 15 Jahren ausgelegt sind, sodass es fraglich ist, ob ein großer Fokus auf die Lebensdauererlängerung notwendig ist.

Eine **überdurchschnittliche Haltbarkeit** kann eine Lösung für CE darstellen. Produkte wie Kraftstoff- und Wischwassertanks oder Kühlkörper in Scheinwerfern müssten so seltener ersetzt werden. Die Balance zwischen langer Haltbarkeit und Wirtschaftlichkeit stellt einen schmalen Grat dar. Es ist nicht immer sinnvoll, Produkte übermäßig zu dimensionieren und länger haltbar zu machen, da dies wirtschaftlich ineffizient sein kann.

**Hohe Qualitätsstandards** sind entscheidend. Beispielsweise werden in der Elektronikfertigung durch die Vorgaben der International Patent Classification (IPC) unterschiedliche Qualitätsklassen festgelegt. IPC-Klasse 1 gilt für Wegwerfelektronik wie günstige Handys, IPC-Klasse 2 ist der Industriestandard, und IPC-Klasse 3 stellt die höchsten Anforderungen für Hochzuverlässigkeitsanwendungen dar. Diese Vorgaben legen beispielsweise fest, wie genau und qualitativ hochwertig Produkte gelötet und gefertigt sein müssen. Bei Automobilzulieferer wird meist die höchste IPC-Klasse angenommen. (Hommer, 2022)

Die Suche und Implementierung von **langlebigen Materialien** und Innovationen dient der Förderung von CE und ist entscheidend, um die Lebensdauer zu verlängern. Zum Beispiel werden in der Automobilindustrie Weichlote verwendet, um Bauteile mit Leiterplatten zu verbinden. Sie sind so viskos, dass sie Vibrationen und Temperaturschwankungen im Betrieb abfedern können. Eine langlebigere Alternative bietet beispielsweise das „Die Top System (DTS)“, welches die Haltbarkeit von Hochleistungselektronik deutlich verlängert und somit die Wartungsanfälligkeit reduziert. (Féry, 2019) Auch die Auswahl von Materialien mit hoher UV-Beständigkeit trägt zur Langlebigkeit bei. Durch gezielte Materialkombinationen und Beschichtungen wird auch Korrosion vorgebeugt, was die Haltbarkeit der Produkte weiter verbessert.

Die Implementierung einer **Echtzeitüberwachung und vorausschauenden Wartung** ist ein weiterer Schlüssel zur Verlängerung der Lebensdauer von Zulieferteilen. Mit Systemen wie Predictive Maintenance können potenzielle Probleme frühzeitig erkannt und wird die Reaktionszeit für Reparaturen von Teilen erheblich verkürzt werden.

Auch **Sicherstellung und Angebot von Reparaturmöglichkeiten** sind wichtige Bestandteile der Lebensdauererlängerung. Es sollte ermöglicht werden, dass Zulieferteile nach Bedarf repariert werden können. Positiv für die Reparaturfähigkeit ist, dass in der Automobilbranche Fahrzeuge regelmäßig in Werkstätten zur Reparatur erscheinen. Ein etabliertes Netzwerk für den Austausch von Teilen und damit zur Verlängerung der Lebensdauer der Fahrzeuge steht zur Verfügung. Das Design der Komponenten spielt hierbei eine entscheidende Rolle, insbesondere hinsichtlich Materialauswahl, Standardisierung und Modularität, die die Wartung und Reparatur erleichtern sollen. Die Verwendung lösbarer Verbindungen ist ein Beispiel dafür, wie Hersteller eine einfachere Reparatur gewährleisten können. Es ist in der Automobilindustrie gängig, dass Werkzeuge und Materialien für ausgelaufene Komponenten über längere Zeiträume vorgehalten werden müssen, um die Reparaturfähigkeit zu gewährleisten. Das **Nutzerverhalten** spielt eine entscheidende Rolle für die optimale Nutzung und damit auch für die Verlängerung der Lebensdauer von Fahrzeugteilen. Insbesondere das vorsichtige Handling, der angepasste Fahrstil und die richtige Anwendung können wesentlich dazu beitragen, dass die Teile länger halten. Unfälle und unsachgemäße Nutzung durch den Fahrer können hingegen erhebliche Auswirkungen auf die Haltbarkeit und Funktionalität der Komponenten haben. Unterschiedliche Nutzungsintensitäten zeigen deutlich, wie stark mechanische Belastungen variieren können – von gelegentlichem Gebrauch bis hin zu häufigem, intensivem Einsatz. Ein schonender Umgang mit den Fahrzeugteilen reduziert nicht nur den Verschleiß, sondern trägt auch zur Vermeidung unnötiger Reparaturen bei.

#### **4.3.2 Lösungen Produktdesign und Innovation**

**Materialinnovationen** sollten bei Zulieferern gefördert werden. Ein bedeutender Aspekt hierbei ist die Erhöhung der Rezyklatanteile. Die Herausforderungen bezüglich der Qualität von Rezyklaten sind zwar noch nicht vollständig gelöst. Dennoch bleibt das langfristige Ziel, den Anteil an recycelten Materialien zu erhöhen, um CE zu fördern. Weiterhin sollten die Entwicklung und Nutzung von Materialien, die weniger

schädliche Auswirkungen auf Umwelt und Gesundheit haben, betrachtet werden. Ein aktuelles Beispiel ist der Ersatz von GFK durch natürliches und recycelbares Material wie Flachs. Flachs ist ein nachwachsender Rohstoff und kann lokal bezogen werden. Materialinnovationen beinhalten auch die Verbesserung von Werkstoffen. So kann die Wärmebehandlung von Motorblöcken deren Widerstandsfähigkeit gegenüber extremen Belastungen erhöhen. Ein weiteres Feld ist die Herstellung von Kunststoffen aus Biomasse. So kann beispielsweise der Kunststoff PE sowohl aus fossilen Rohstoffen als auch aus Biomasse hergestellt werden. Dies reduziert die Abhängigkeit von fossilen Rohstoffen.

Es ist notwendig eine **Materialvereinheitlichung** sicherzustellen. Eine zentrale Erkenntnis aus den Interviews ist, dass die Nutzung weniger und einfacher Kunststoffe wie Polyethylen (PE) und Polypropylen (PP) erhebliche Vorteile bietet. Diese Materialien sind nicht nur weit verbreitet und leicht recycelbar, sondern könnten auch auf Basis von Biomasse produziert werden. Ein weiteres Beispiel für **Materialoptimierung** ist der Verzicht auf Materialien wie Blei in bestimmten Modulen. Durch die Einführung neuer Technologien, die auf Verklebungen statt auf Lötverbindungen setzen, können umweltbelastende Materialien vermieden werden. Obwohl Verklebungen eine Herausforderung beim späteren Recycling darstellen könnten, bieten sie dennoch Vorteile in Bezug auf die Materialeffizienz und die Reduzierung schädlicher Substanzen. Ein zentraler Punkt bei der Umsetzung von CE ist die langfristige Planung. Soweit eine Wiederverwendung geplant, müssen Produkte so gestaltet werden, dass sie nach 10 oder 20 Jahren wiederverwertet oder erneut genutzt werden können. Dies erfordert eine Vereinfachung der Materialien und eine sorgfältige Dimensionierung der Bauteile. Die Prinzipien von CE müssen in den **Entwicklungsprozess integriert** und bereits in der Designphase berücksichtigt werden. Diese umfassen die zukünftige Demontagemöglichkeit, Lebensdauererlängerung, Recyclingfähigkeit und die Zusammensetzung der Produkte. Dazu kann die praxisnahe Methodik für ein „Design for Circularity“, die am INEC mit Partnern entwickelt wurde, genutzt werden (Pruhs et al. 2023, Kusch et al. 2024), unterstützt durch das Tool „Circularity Navigator“ (<https://www.circularity-navigator.com/>). Innerhalb der Entwicklungsabteilungen ist ein Bewusstsein für die verschiedenen Aspekte von CE zu fördern. Es ist essenziell, dass Ingenieure und Designer eng zusammenarbeiten, um Lösungen zu entwickeln. Die IMDS-Datenbank (International Material Data System) kann dabei helfen, die Zusammensetzung der Materialien zu analysieren und Entscheidungen bezüglich der CE-Fähigkeit zu treffen.

Das IMDS ist ein globaler Standard zur Erfassung, Verwaltung, Analyse und Archivierung von Materialdaten in der Automobilproduktion. (EntServ Deutschland GmbH, 2024) Designer sollten langfristig denken und zukünftige Gesetzesänderungen sowie technologische Entwicklungen im Blick behalten.

Weitere Lösungen bieten die **Modularität und Standardisierung** der Zulieferteile. Diese ermöglicht die Aufteilung eines Systems in unabhängige, austauschbare Module. Ein modularer Aufbau reduziert Validierungskosten erheblich, beispielsweise Test- und Prüfkosten. Durch eine Standardisierung kann bei ähnlichen Produkthanfragen auf bereits vorhandene Formen und Designs zurückgegriffen werden, was zusätzliche Produktionskosten, sowie Zeit spart und unnötige Komplexität verhindert. Obwohl Modularität viele Vorteile bietet, hängt deren Umsetzung stark vom Kundenwillen ab. Hier ist es wichtig, auf den engen Austausch zwischen Zulieferer und Kunden zu setzen. Ein Baukastensystem für Produkte, wie es bereits in der Automobilindustrie bei Fensterhebern oder Sitzverstellungen etabliert ist, kann die Variantenvielfalt reduzieren und standardisierte Module in verschiedenen Fahrzeugen verwenden. Modularität sollte daher in den Konstruktionsrichtlinien verankert sein. Verbindungen sollten gesteckt oder geschraubt werden, anstatt geklebt oder geschweißt, um die Wiederverwendbarkeit und Recyclingfähigkeit zu verbessern.

Es ist essenziell, dass Automobilzulieferer **CE-Kompetenzen** aufbauen und **Kunden eng beraten**, um die Integration von CE zu fördern. Eine enge Zusammenarbeit zwischen Zulieferern und Kunden ist von zentraler Bedeutung. Im Bereich des Co-Engineering, bei dem eng mit den Kunden zusammengearbeitet wird, um deren Anforderungen zu verstehen und gemeinsam die Spezifikationen zu definieren, besteht eine größere Möglichkeit, die CE-Fähigkeit des Produkts zu steuern. Co-Engineering bietet somit mehr Handlungsspielraum zur Durchsetzung von CE-Aspekten. Durch eine kompetente Beratung der Kunden können Zulieferer auf technische Details und notwendige Materialeigenschaften hinweisen, wie z.B. die Mindestdicke von Beschichtungen, um die Funktionsfähigkeit von Bauteilen sicherzustellen.

Um CE im **EOL** sicherzustellen, ist es entscheidend, bereits während des Designs Demontagemöglichkeiten zu berücksichtigen. So sollten bestimmte Teile leicht zugänglich und entfernbar gestaltet werden. So sind z.B. Verbindungen so zu gestalten, dass sie demontierbar sind und eine hohe Austauschbarkeit der Bauteile möglich ist. Es ist entscheidend, Experten zu haben, die sich mit Design, dessen Auswirkungen, CE und dem EOL auskennen. Solche Kompetenzen tragen zur Optimierung der

Produktqualität und -lebensdauer bei. Darüber hinaus sollte der Zustand von Produkten, wenn diese das EOL erreichen, analysiert werden. Diese Analyse liefert wertvolle Informationen für zukünftige Verbesserungen.

Die **Förderung von Kooperationen und die Sensibilisierung** innerhalb der Lieferkette ist entscheidend für die Lösung der Herausforderungen von CE. Auch wären gemeinsame, firmenübergreifende Lösungsansätze für Recycling notwendig. Die Sensibilisierung für diese Themen muss weiter verbessert werden, um eine breitere Akzeptanz und Umsetzung zu fördern.

Für Lösungen zur CE-Implementierung ist eine verstärkte Nutzung von **Simulation und Tests** entscheidend. Dies umfasst die Durchführung von Lebensdauerzyklustests, gefolgt von entsprechenden Anpassungen der Produkte. Während des Entwicklungsprozesses werden bereits Produkttests durchgeführt, die verschiedene Nutzungsbedingungen simulieren. Darüber hinaus werden umfangreiche Simulationstechniken verwendet, um Produkte digital im Voraus zu analysieren. Modellierungs- und Simulationstechniken sind regelmäßig mit realen Tests abzugleichen.

#### **4.3.3 Lösungen EOL und Kreislaufschließung**

Zulieferer können durch gezielte Designentscheidungen die Trennbarkeit und die Verwertungsmöglichkeiten ihrer Teile erheblich verbessern. Eine Berücksichtigung des EOL bereits in der Designphase beeinflusst die Zirkularität im gesamten Produktlebenszyklus maßgeblich. Dem Zulieferteil sollten Informationen mitgegeben werden, z.B. über Marker, Aufdrucke, Labels oder die Bereitstellung digitaler Informationen. Wenn Entsorger Zugriff auf das IMDS hätten, könnten sie anhand des Teile-Codes exakt bestimmen, welches Bauteil von welchem Lieferanten stammt und aus welchem Werkstoff es besteht. Eine effektive Kommunikation könnte durch Produktpässe, Auto-ID-Technologien oder das IMDS-System erreicht werden. Dies würde sicherstellen, dass alle notwendigen Informationen zur Materialtrennung und -verwertung vorliegen und die CE-Prinzipien besser umgesetzt werden können.

Eine weitere Möglichkeit wäre der **Aufbau weiterer Aufbereitungsinfrastrukturen**. Diese könnten durch Kooperationen mit Schrottplätzen und Verwertungsunternehmen realisiert werden. Schrottplätze, die bisher hauptsächlich auf Recycling ausgerichtet sind, könnten auch vermehrt als Sammelstellen für wiederverwendbare Komponenten dienen. Recycler könnten sicherstellen, dass wertvolle Materialien wie Aluminium,

Stahl und Kupfer besser zurückgeführt werden. Demontagelinien für Gesamtfahrzeuge könnten gezielt hochwertige Komponenten zurückzugewinnen.

**Neuartige Miet- oder Leasingmodelle** können den Zugang zu gebrauchten Teilen erleichtern. In einem solchen Modell würden Fahrzeuge nicht mehr verkauft, sondern nur noch vermietet. Nach Ablauf der Mietdauer würden die Fahrzeuge an den Hersteller zurückgehen, der sie zerlegt und die Teile wiederverwendet. Dies würde nicht nur den Kreislauf schließen, sondern auch verhindern, dass Fahrzeuge in Länder exportiert werden, in denen die Kontrolle über die Rückführung der Teile verloren geht. Allerdings erfordert dies einen kulturellen Wandel sowohl bei den Herstellern als auch bei den Endverbrauchern.

#### 4.3.4 Lösungen Kommunikation

Nachhaltigkeitsthemen im Allgemeinen werden innerhalb der Lieferkette häufig über formelle Mechanismen wie **Codes of Conduct, Zertifizierungen, Lastenhefte und Audits** kommuniziert. Diese Instrumente dienen dazu, die Anforderungen der Kunden an die Zulieferer weiterzugeben und deren Einhaltung zu überwachen. Ein erhebliches Hindernis für eine effiziente Kommunikation in der Lieferkette sind die zahlreichen unterschiedlichen **Kundenportale** und individuellen **Fragebögen**, welche die Zulieferer ausfüllen müssen.

Das Projekt **Catena-X**, welches eine transparente Lieferkette in der Automobilindustrie sicherstellen soll, stellt einen vielversprechenden Ansatz dar. Obwohl CE-Themen bisher wenig integriert sind, könnte Catena-X eine übergreifende Lösung bieten.

Das **IMDS** wird bereits von den meisten Zulieferern genutzt und könnte als Basis für die Integration von CE-Themen dienen. IMDS erfasst sämtliche Bauteile und verwendeten Rohstoffe, was eine detaillierte Nachverfolgung ermöglicht. Es ist ein etabliertes System, das die Erfassung und den Austausch von Materialdaten standardisiert und dient als zentrales Reporting-Tool, das eine „chemiegerechte“ Zuordnung jedes Werkstoffs ermöglicht. (EntServ Deutschland GmbH, 2024) Dort sind auch schon Rezyklanteile hinterlegt. Ein Verwerter könnte im IMDS detaillierte Informationen über die Zusammensetzung der Bauteile abrufen, sofern er Zugang zu den entsprechenden Daten hat. Dadurch wäre es möglich, spezifische Komponenten und ihre Materialien, korrekt zu identifizieren und entsprechend zu trennen. Auf Knopfdruck können so die Inhaltsstoffe sämtlicher Bauteile und verwendeten Rohstoffe angezeigt werden.

Würden Catena-X und das IMDS-Datensystem mit CE-Kennzahlen erweitert und Zugang für alle relevanten Akteure geschaffen werden, wäre diese Transparenz ein weiterer wichtiger Schritt zur Umsetzung von CE. Dieses System müsste auch mit einem digitalen Produktpass gebündelt werden. Auch könnten Komponenten Informationen über Auto-ID-Technologien, wie Radio-Frequency Identification (RFID), QR-Codes oder Marker mitgegeben werden. So könnte die automatische Identifikation und Verfolgung von Materialien und Produkten entlang der gesamten Lieferkette bis hin zum Ende ihres Lebenszyklus ermöglicht werden.

#### **4.3.5 Zwischenfazit zu den ermittelten Lösungen**

Einige Lösungsvorschläge zur Implementierung von CE konzentrieren sich auf die Verlängerung der Produktlebensdauer. Dazu gehören die Herstellung langlebiger Materialien, das Angebot hoher Qualitätsstandards, Echtzeitüberwachung und vorausschauende Wartung sowie die Sicherstellung von Reparaturmöglichkeiten und der optimalen Nutzung während der gesamten Lebensdauer. Ein weiterer Ansatz zur CE-Implementierung besteht darin, CE-Prinzipien in den Entwicklungs- und Designprozess zu integrieren, was durch die Nutzung von Datenbanken wie IMDS unterstützt werden kann. Dort können dann auch Aspekte des EOL wie z.B. Demontagefähigkeit eingebracht werden. Weiterhin ist die Vereinheitlichung von Materialien wichtig. Materialinnovationen spielen eine zentrale Rolle, beispielsweise die Erhöhung des Anteils an Rezyklaten, auch wenn dabei Hürden bestehen. Der Einsatz von natürlichen und biobasierten Materialien sowie umweltfreundlichen Fertigungsmedien wird ebenfalls als Lösung betrachtet. Modularität und Standardisierung sind wichtig, um die Akzeptanz bei den Kunden zu fördern. Auch sollten die Kunden eng in Entwicklungsaktivitäten eingebunden werden.

Kooperationen und die Sensibilisierung der Lieferkette sollten gefördert werden. Eine nachhaltige Optimierung der Produktion ist ebenfalls entscheidend.

Der Aufbau von CE-Kompetenzen bei Mitarbeitern und die enge Beratung von Kunden ist essenziell. Kommunikationskanäle sollten durch Plattformen wie Catena-X oder IMDS gebündelt und um CE-Themen erweitert werden, auch Auto-ID-Technologien können durch Informationsweitergabe Transparenz und Kommunikation innerhalb der Lieferkette fördern.

## 5 Fazit und Ausblick

Die Studie zeigt, dass Automobilzulieferer beim Übergang zur Circular Economy (CE) mit komplexen Herausforderungen konfrontiert sind, die sowohl technische als auch strukturelle, wirtschaftliche und kommunikative Aspekte betreffen. Zentrale Hindernisse liegen in der Nutzung von Sekundärmaterialien, der Wiederverwendung von Teilen, der Rückführung am Ende des Lebenszyklus (EOL) sowie in der unzureichenden Kommunikation innerhalb der Lieferkette.

Die Qualität, Sortenreinheit und Verfügbarkeit von Sekundärmaterialien reicht häufig nicht aus, um die hohen Anforderungen der Branche zu erfüllen – insbesondere bei sicherheitsrelevanten Komponenten. Gleichzeitig fehlen Transparenz über Rezyklatzusammensetzung und regulatorische Klarheit. Primärmaterialien bleiben daher in vielen Fällen die wirtschaftlich und technisch bevorzugte Option.

Die Wiederverwendung gebrauchter Teile scheitert bisher an fehlender technischer Kompatibilität, alten Designs, Sicherheitsbedenken sowie an der geringen Akzeptanz bei OEMs und Endkunden. Auch Remanufacturing wird nur vereinzelt als praktikabel angesehen, da logistische, wirtschaftliche und infrastrukturelle Barrieren eine Umsetzung erschweren. Zudem fehlt vielen Zulieferern der Einblick in das tatsächliche EOL ihrer Produkte – Designentscheidungen enden oft mit der Auslieferung an OEMs.

Die Interviews verdeutlichen, dass CE-Konzepte in der Praxis selten aktiv kommuniziert oder nachgefragt werden. Es fehlt an verbindlichen Strukturen und Tools zur Weitergabe relevanter Informationen über Materialeigenschaften und Rückführungsoptionen entlang der Lieferkette.

Als Lösungsansätze wurden unter anderem die Entwicklung langlebiger Produkte, die Integration von CE in Designprozesse (z. B. modulare Bauweisen, standardisierte Materialien), der Aufbau von CE-Kompetenzen sowie ein aktiveres Co-Engineering mit OEMs genannt. Digitale Werkzeuge wie das IMDS oder Catena-X könnten durch erweiterte CE-Funktionalitäten – etwa digitale Produktpässe oder Auto-ID-Technologien – zu mehr Transparenz beitragen. Auch sollten zentrale Herausforderungen wie Recyclingfähigkeit, Demontierbarkeit und Rückführungslogistik bereits in der Produktentwicklung berücksichtigt werden.

Die Studie zeigt, dass CE-Umsetzung nicht allein durch technologische Maßnahmen gelingt, sondern ein ganzheitlicher Wandel in Kooperation, Kommunikation und Strategie erforderlich ist.

Die Zukunft der CE in der Automobilindustrie erfordert grundlegende Fortschritte in Produktdesign, Materialwahl, Lieferkettenorganisation und End-of-Life-Strategien. Aktuell ist die Wiederverwendung von Bauteilen kaum realisierbar, was den CE-Prinzipien widerspricht. Gleichzeitig stellen Anforderungen an lange Haltbarkeit der Komponenten technische Herausforderungen für Demontage und Recycling dar. Um diese Zielkonflikte zu lösen, sind gezielte Material- und Designinnovationen erforderlich, die Sicherheitsstandards und Kreislauffähigkeit in Einklang bringen.

Besonders relevant ist die Harmonisierung von Sicherheitsanforderungen mit CE-Zielen – etwa durch verbesserte Demontierbarkeit, standardisierte Materialien und technologische Fortschritte in der Rückführung und Wiederaufbereitung. Für einen Großteil der Komponenten fehlen noch etablierte Rückführungspfade vom End-of-Life zurück zu den Zulieferern. Hochwertiges Recycling ist nur möglich, wenn bereits in der Konstruktion auf Trennbarkeit und Materialreinheit geachtet wird.

Die Ergebnisse der Studie unterstreichen die Bedeutung einer engeren Kooperation in der Lieferkette. CE erfordert einen systemischen Ansatz, der Informationsflüsse, Zuständigkeiten und wirtschaftliche Abhängigkeiten berücksichtigt. Gerade kleinere Zulieferer (MZ) haben wenig Einfluss auf Designentscheidungen, die meist durch OEMs oder Tier-1-Zulieferer getroffen werden. Trotz ambitionierter Nachhaltigkeitsziele der OEMs fehlt es oft an Kompatibilität mit konkreten Vorgaben. Interviewpartner kritisieren Zielkonflikte und mangelnde Offenheit gegenüber Vorschlägen – selbst bei nicht sicherheitsrelevanten Komponenten.

Zukunftsweisend ist daher nicht nur die technische Umsetzung von CE, sondern auch ein kultureller Wandel hin zu mehr Kooperation, Gestaltungsspielraum und Dialog entlang der gesamten Wertschöpfungskette. Plattformen wie IMDS oder Catena-X könnten diesen Wandel durch digitale Transparenz unterstützen – vorausgesetzt, CE-relevante Daten werden systematisch integriert und zugänglich gemacht.

Ein weiterer Entwicklungspfad betrifft die strategische Neuausrichtung von Zulieferunternehmen. Einzelne Betriebe beginnen bereits, sich neue Geschäftsfelder zu erschließen – etwa im Bereich alternativer Antriebe oder nachhaltiger Komponenten. CE kann hier auch als Innovationschance verstanden werden, um die eigene Wettbewerbsfähigkeit zukunftssicher auszurichten.

Langfristig entscheidet sich der Erfolg von CE daran, ob ökologische Ziele nicht nur formuliert, sondern entlang konkreter industrieller Rahmenbedingungen realistisch umgesetzt werden können – technologisch, wirtschaftlich und strukturell.

## 6 Literaturverzeichnis

- AAMPACT e.V. (2024). *Mein Autolexikon: Teile des modernen Autos entdecken*. <https://www.mein-autolexikon.de> abgerufen am 17.06.2024
- acatech, Circular Economy Initiative & SYSTEMIQ (2021). *Zirkuläre Geschäftsmodelle: Barrieren überwinden, Potenziale freisetzen: Kurzfassung und Handlungsempfehlungen*. [https://www.acatech.de/publikation/zirkulaere-geschaeftsmodelle-barrieren-ueberwinden-potenziale-freisetzen/download-pdf/?lang=de\\_excerpt](https://www.acatech.de/publikation/zirkulaere-geschaeftsmodelle-barrieren-ueberwinden-potenziale-freisetzen/download-pdf/?lang=de_excerpt)
- Agrawal, R., Wankhede, V. A., Kumar, A. & Luthra, S. (2021). Analysing the road-blocks of circular economy adoption in the automobile sector: Reducing waste and environmental perspectives. *Business strategy and the environment* (30), Artikel 2, S. 1051-1066. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/bse.2669>
- Alamerew, Y. A. & Brissaud, D. (2020). Modelling reverse supply chain through system dynamics for realizing the transition towards the circular economy: A case study on electric vehicle batteries. *Journal of Cleaner Production* (254), S. 1-12. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095965262030072X/pdf?md5=61eb33390dbf1e67982de9d02242d41b&pid=1-s2.0-S095965262030072X-main.pdf>
- Amir, S., Salehi, N., Roci, M., Sweet, S. & Rashid, A. (2022). Towards circular economy: A guiding framework for circular supply chain implementation. *Business strategy and the environment* (32), Artikel 6, S. 2684-2701. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/bse.3264>
- Awan, U., Sroufe, R. & Shahbaz, M. (2021). Industry 4.0 and the circular economy: A literature review and recommendations for future research. *Business strategy and the environment* (30), Artikel 4, S. 2038-2060. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/bse.2731>
- Batista, L., Bourlakis, M., Liu, Y. & Sohal, A. (2015). Supply chain operations for a circular economy. *Production Planning & Control* (29). <http://nectar.northampton.ac.uk/10270/8/Supply%20chain%20operations%20for%20a%20circular%20economy.pdf>
- Catena-X Automotive Network e.V. (2024). *Catena-X: Your Automotive Network*. <https://catena-x.net/de/> abgerufen am 14.07.2024

- Denyer, D [D.] & Tranfield, D. (2009). Producing a systematic review. In D. Buchanan & A. Bryman (Hrsg.), *The Sage handbook of organizational research methods* (S. 671-689). Sage Publications Ltd. <https://psycnet.apa.org/record/2010-00924-039>
- Deutsches Institut für Normung e.V. (2023). *DIN SPEC 91472: Remanufacturing (Reman) – Qualitätsklassifizierung für zirkuläre Prozesse*. <https://www.dinmedia.de/de/technische-regel/din-spec-91472/367509951>
- EntServ Deutschland GmbH (2024). *IMDS Materialdatensystem*. <https://www.mdsystem.com/imdsnt/startpage/index.jsp> abgerufen am 15.07.2024
- Europäisches Parlament und der Rat der Europäischen Union (2008). *Richtlinie 2008/98/EG des europäischen Parlaments und des Rates vom 19. November 2008 über Abfälle und zur Aufhebung bestimmter Richtlinien*. Amtsblatt der Europäischen Union. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32008L0098>
- Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union (2023). *Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 - Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 vom 18. Dezember 2006 zur Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung chemischer Stoffe (REACH), zur Schaffung einer Europäischen Agentur für chemische Stoffe, zur Änderung der Richtlinie 1999/45/EG und zur Aufhebung der Verordnung (EWG) Nr. 793/93 des Rates, der Verordnung (EG) Nr. 1488/94 der Kommission, der Richtlinie 76/769/EWG des Rates sowie der Richtlinien 91/155/EWG, 93/67/EWG, 93/105/EG und 2000/21/EG der Kommission*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:02006R1907-20231201>
- European Commission (2020a). *Categorisation System for the Circular Economy: A sector-agnostic approach for activities contributing to the circular economy*. Publications Office of the European Union. [https://circulareconomy.europa.eu/platform/sites/default/files/categorisation\\_system\\_for\\_the\\_ce.pdf](https://circulareconomy.europa.eu/platform/sites/default/files/categorisation_system_for_the_ce.pdf)
- European Commission (2020b). *Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the regions: A new Circular Economy Action Plan: For a cleaner and more competitive Europe* (Bd. 98). <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1583933814386&uri=COM:2020:98:FIN>

- European Commission (2020c). *A new Circular Economy Action Plan for a cleaner and more competitive Europe* (COM(2020) 98 final). [https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:9903b325-6388-11ea-b735-01aa75ed71a1.0017.02/DOC\\_1&format=PDF](https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:9903b325-6388-11ea-b735-01aa75ed71a1.0017.02/DOC_1&format=PDF)
- European Environment Agency (2016). *Circular economy in Europe Developing the knowledge base* (Bd. 02). [https://www.eea.europa.eu/publications/circular-economy-in-europe/at\\_download/file](https://www.eea.europa.eu/publications/circular-economy-in-europe/at_download/file)
- Fehrer, J. A. & Wieland, H. (2021). A systemic logic for circular business models. *Journal of Business Research* (125), S. 609-620. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0148296320301041>
- Féry, C. (2019). *Den Chip sintern, nicht löten: die Stärken des „Die Top Systems“*. <https://www.elektronikpraxis.de/den-chip-sintern-nicht-loeten-die-staerken-des-die-top-systems-a-cb8fdcd9f48ddb3fd0f47edccf592be8/> abgerufen am 15.06.2024
- Fieten, R. (1991). Zulieferer – abhängige Partner der Endprodukthersteller. In R. Fieten (Hrsg.), *Erfolgsstrategien für Zulieferer: Von der Abhängigkeit zur Partnerschaft Automobil- und Kommunikationsindustrie* (S. 15-33). Gabler. [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-322-82553-7\\_1](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-322-82553-7_1)
- Fischer-Kowalski, M., Swilling, M. & v. Weizäcker, E. U. (2011). *Decoupling natural resource use and environmental impacts from economic growth*. [https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/9816/Decoupling\\_FReport\\_EN.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/9816/Decoupling_FReport_EN.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Germany Trade & Invest (2023). *The Automotive Industry in Germany*. [https://www.gtai.de/resource/blob/64100/8fc3cff5774c2ec699172cd823a0ec0e/20220711\\_IO\\_Automotive\\_WEB.pdf](https://www.gtai.de/resource/blob/64100/8fc3cff5774c2ec699172cd823a0ec0e/20220711_IO_Automotive_WEB.pdf) abgerufen am 23.03.2024
- Heigl, K. M. & Rennhak, C. (2012). *Zukünftige Wettbewerbsstrategien für Automobilzulieferer: Chancen und Risiken der dritten Revolution in der Automobilindustrie*. ibidem. [https://books.google.de/books?id=vYs0DwAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=de&source=gbs\\_ge\\_summary\\_r&cad=0#v=onepage&q&f=false](https://books.google.de/books?id=vYs0DwAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=de&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false)
- Hommer (2022). *Eine umfassende Anleitung zur Bestimmung von Produkten der IPC-Klasse*. <https://pcbleiterplatte.com/ipc-klasse.html> abgerufen am 24.07.2024

- Hopkinson, P., Zils, M., Hawkins, P. & Roper, S. (2018). Managing a Complex Global Circular Economy Business Model: Opportunities and Challenges. *California Management Review* (60), Artikel 3, S. 71-94. <https://web.p.ebsco-host.com/ehost/pdfviewer/pdfviewer?vid=7&sid=bf2fd6b4-4932-4988-a07f-5c9104cc858f%40redis>
- Jakhar, S. K., Luthra, S., Mangla, S. K., Rai, D. & Yadav, G. (2020). A framework to overcome sustainable supply chain challenges through solution measures of industry 4.0 and circular economy: An automotive case. *Journal of Cleaner Production* (254), S. 1-15. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652620301591/pdf?md5=1062bb4bbd4e46571fd45cc734fa1a73&pid=1-s2.0-S0959652620301591-main.pdf>
- Jean, R.-J. , Kim, D. & Sinkovics, R. R. (2012). Drivers and Performance Outcomes of Supplier Innovation Generation in Customer-Supplier Relationships: The Role of Power-Dependence. *Decision Sciences* (43), Artikel 6, S. 1003-1038. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1111/j.1540-5915.2012.00380.x>
- Jepsen, D. & Zimmermann, T. (2023). 2. Runder Tisch zum Handlungsfeld „zirkuläre Produktionsprozesse“: Kurzvorstellung der vom BMUV priorisierten Maßnahmen. <https://dialog-nkws.de/bmu/de/home/file/fileId/215/name/Pr%C3%A4sentation%20Dirk%20Jepsen%20und%20Dr.%20Till%20Zimmermann%20%C3%96kopol.pdf>  
abgerufen am 12.03.2024
- Kalverkamp, M. & Raabe, T. (2017). Automotive Remanufacturing in the Circular Economy in Europe: Marketing System Challenges. *Journal of Macromarketing* (38), Artikel 1, S. 112-130. <https://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1177/0276146717739066>
- Kusch, A., Pruhs, A., Woidasky, J., Brinker, J. (2024): Circularity Navigator. *Industry 4.0 Science*, 40. Jg., Nr. 1, S.6-13. <https://doi.org/10.30844/I4SD.24.1.6>
- Kus, A. O., Ayvaz, B., Cin, E. & Aydin, N. (2019). Optimization of reverse logistics network of End of Life Vehicles under fuzzy supply: A case study for Istanbul Metropolitan Area. *Journal of Cleaner Production* (215), S. 1036-1051. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652619301015/pdf?md5=0030d04b065ca035cc561280cca9b4a2&pid=1-s2.0-S0959652619301015-main.pdf>

- Lache, G. (2023). *Brückenbauer, Netzwerker und Kümmerer*. [https://cms.wirtschaftskraft.de/wp-content/uploads/2021/01/WFG\\_Download-PDF-1.pdf](https://cms.wirtschaftskraft.de/wp-content/uploads/2021/01/WFG_Download-PDF-1.pdf) zuletzt geprüft am 12.03.2024
- Mentz, M. (2006). Mergers & Acquisitions in der Automobilzulieferindustrie: Werterschöpfungspotentiale durch internationale Positionierung. *Schriftreihe der European Business School International University Schloß Reichartshausen* (59). <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-8350-9177-1>
- Nag, U., Sharma, S. K. & Govindan, K. (2021). Investigating drivers of circular supply chain with product-service system in automotive firms of an emerging economy. *Journal of Cleaner Production* (319), S. 1-19. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652621028328>
- pm/gel (2023). *Sieben Millionen Euro für Automotive-Projekt „TraFoNetz Nordschwarzwald“*. <https://wirtschaftskraft.de/artikel/sieben-millionen-euro-fuer-automotive-projekt-trafonetz-nordschwarzwald> abgerufen am 12.03.2024
- Potting, J., Hekkert, M. P., Worrell, E. & Hanemaaijer, A. (2017). Circular Economy: Measuring innovation in the product chain. *PBL Netherlands Assessment Agency*, S. 1-46. [https://www.researchgate.net/publication/319314335\\_Circular\\_Economy\\_Measuring\\_innovation\\_in\\_the\\_product\\_chain](https://www.researchgate.net/publication/319314335_Circular_Economy_Measuring_innovation_in_the_product_chain)
- Prochatzki, G., Mayer, R., Haenel, J., Schmidt, A., Götze, U., Ulber, M., Fischer, A. & Arnold, M. G. (2023). A critical review of the current state of circular economy in the automotive sector. *Journal of Cleaner Production* (425), S. 1-15. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652623029451>
- Pruhs, A., Kusch, A., Bertagnolli, F., Viere, T., Woidasky, J. (2023): Makigami im Produktentstehungsprozess - Einsatz einer Lean-Methodik zur Integration eines nachhaltigen und zirkulären Produktdesigns. *I40M 2023*: 55–60. [https://doi.org/10.30844/IM\\_23-6\\_55-60](https://doi.org/10.30844/IM_23-6_55-60).
- Rodríguez-González, R. M., Maldonado-Guzmán, G., Madrid-Guijarro, A. & Garza-Reyes, J. A. (2022). Does circular economy affect financial performance? The mediating role of sustainable supply chain management in the automotive industry. *Journal of Cleaner Production* (379), S. 1-8. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652622042421/pdf?md5=45c40c272ec1c39e946442d226cd2b0d&pid=1-s2.0-S0959652622042421-main.pdf>

- Rudolph, C. (2018). Geschäftsmodell Circular Economy: Gegenwart und Zukunft der (erweiterten) Kreislaufwirtschaft. In P. Bungard (Hrsg.), *Management-Reihe Corporate Social Responsibility. CSR und Geschäftsmodelle: Auf dem Weg zum zeitgemäßen Wirtschaften* (S. 123-137). Springer Gabler.  
[https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-662-52882-2\\_7](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-662-52882-2_7)
- Saidani, M., Yannou, B., Leroy, Y. & Cluzel, F. (2018). Heavy vehicles on the road towards the circular economy: Analysis and comparison with the automotive industry. *Resources, Conservation and Recycling* (135), S. 108-122.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344917301714>
- Saidani, M., Yannou, B., Leroy, Y. & Cluzel, F. (2020). Dismantling, remanufacturing and recovering heavy vehicles in a circular economy—Technico-economic and organisational lessons learnt from an industrial pilot study. *Resources, Conservation and Recycling* (156), S. 1-18. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344920300069>
- Schallenberg, A. (2024). *Kollidierende Paradigmen: Die Anpassung von Zulieferern an die sich verändernde Dynamik durch Circular Economy in der Automobilindustrie. Eine Untersuchung von Herausforderungen und Lösungen*, Masterarbeit, Hochschule Pforzheim, Pforzheim, <https://opus-hspf.bsz-bw.de/door/index/index/docId/512>
- Sharma, L. & Pandey, S. (2020). Recovery of resources from end-of-life passenger cars in the informal sector in India. *Sustainable Production and Consumption* (24), S. 1-11. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S235255092030230X/pdf?md5=4e55cf59ce7d97b0b137d422b2479666&pid=1-s2.0-S235255092030230X-main.pdf>
- Sonar, H., Mukherjee, A., Gunasekaran, A. & Singh, R. K. (2022). Sustainable supply chain management of automotive sector in context to the circular economy: A strategic framework. *Business strategy and the environment* (31), Artikel 7, S. 3635-3648. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/bse.3112>
- TraFoNetz. (2023). FAQ. <https://trafonetz.de/faq> abgerufen am 17.07.2024
- Verband der Automobilindustrie (2018). *Jahresbericht 2018: Die Automobilindustrie in Daten und Fakten*. [https://www.vda.de/dam/jcr:eb3eb646-841e-4466-8bcf-8b6e7a19061d/VDA\\_JB\\_2018\\_DE.pdf?mode=view](https://www.vda.de/dam/jcr:eb3eb646-841e-4466-8bcf-8b6e7a19061d/VDA_JB_2018_DE.pdf?mode=view) abgerufen am 11.03.2024
- Weber, T. & Stuchtey, M. (2019). *Pathways towards a German Circular Economy: Lessons from European Strategies Preliminary Study*. Circular Economy

Initiative Deutschland; Deutsche Akademie der Technikwissenschaften (acatech).

[https://static1.squarespace.com/static/5b52037e4611a0606973bc79/t/625555235e45ed4cd5c13dfc/1649759543587/Circular\\_Economy\\_EN+Vorstudie.pdf](https://static1.squarespace.com/static/5b52037e4611a0606973bc79/t/625555235e45ed4cd5c13dfc/1649759543587/Circular_Economy_EN+Vorstudie.pdf)

Woidasky, J., Lang-Koetz, C. & Fimpeler, S. (Hrsg.) (2025). *Einführung in die Kreislaufwirtschaft: Betriebliches Abfall- und Nachhaltigkeitsmanagement*. Springer Nature.

Yu, Z., Khan, S. A. R. & Umar, M. (2022). Circular economy practices and industry 4.0 technologies: A strategic move of automobile industry. *Business Strategy and the Environment* (31), Artikel 3, S. 796-809. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/bse.2918>