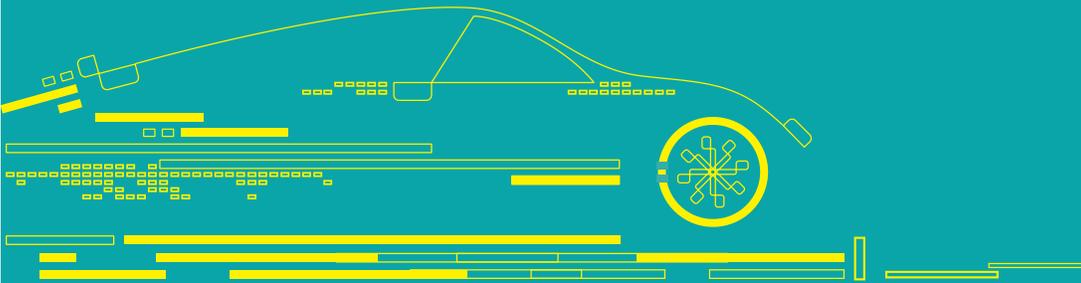


The logo for CEWI (Circular Economy as Innovation Driver) consists of the letters 'CEWI' in a stylized, outlined font.

RESSOURCENEFFIZIENT
KLIMANEUTRAL



automobil

Chancen und Risiken im Automobilsektor für die Umsetzung einer klimaneutralen und ressourceneffizienten zirkulären Wirtschaft

Vorstudie im Rahmen des Verbundvorhabens Circular Economy als
Innovationsmotor für eine klimaneutrale und ressourceneffiziente Wirtschaft (CEWI)

*Nadine Braun, Lucie Hopfensack, Marina Fecke und Dr. Henning Wilts
Mai 2021*





ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

BEV	Battery electric vehicle (Batterieelektroauto)
Kfz	Kraftfahrzeug
LIBs	Lithium-Ionen-Batterien
Lkw	Lastkraftwagen
NEFZ	Neuer Europäischen Fahrzyklus
OEM	Original Equipment Manufacturer (Fahrzeughersteller)
PHEV	Plug-in hybrid electric vehicle (Plug-in-Hybrid)
Pkw	Personenkraftwagen
THG	Treibhausgas
VDA	Verband der Automobilindustrie e.V.
WLTP	Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedur



TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Bewertung der Maßnahmen-Cluster zum CE-Ansatz Schließung der Stoffkreisläufe	20
Tabelle 2: Bewertung der Maßnahmen-Cluster zum CE-Ansatz Steigerung der Produkt- und Materialeffizienz	22
Tabelle 3: Bewertung der Maßnahmen-Cluster zum CE-Ansatz Verlängerung der Lebensdauer und effizientere Nutzung der Produkte.....	25
Tabelle 4: Bewertung der Maßnahmen-Cluster zum CE-Ansatz Substitution von Rohstoffen und Materialien	27

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Vorgehensweise	8
Abbildung 2: Zuordnung der Strategien verschiedener CE-Modelle zu den in der Vorstudie zugrunde liegenden Ansätzen.....	8
Abbildung 3: Bewertungskriterien bzgl. Klimaneutralität, Ressourceneffizienz und allgemeiner Hindernisse	9
Abbildung 4: Bewertungskriterien nach Entwicklungsstand und Potenzialen für Geschäftsmodelle	10
Abbildung 5: Schematische Darstellung – Phase 2: Analyse und Phase 3: Ergebnis	10
Abbildung 6: Vereinfachte Wertschöpfungskette des Automobilsektors	11
Abbildung 7: Übersicht der rechtlichen Rahmenbedingungen im Automobilsektor	12
Abbildung 8: CE-Ansätze und deren Leitsätze	16
Abbildung 9: Maßnahmen-Cluster zum CE-Ansatz Schließung der Stoffkreisläufe	17
Abbildung 10: Maßnahmen- Cluster zum CE-Ansatz Steigerung der Produkt- und Materialeffizienz	21
Abbildung 11: Maßnahmen-Cluster zum CE-Ansatz Verlängerung der Lebensdauer & effizientere Nutzung der Produkte	23
Abbildung 12: Maßnahmen-Cluster zum CE-Ansatz Substitution von Rohstoffen und Materialien.....	26
Abbildung 13: Darstellung der ausgewählten Handlungsfelder und deren Einfluss auf die Wertschöpfungskette...28	
Abbildung 14: Nächste Schritte im Projektverlauf von CEWI	30
Abbildung 15: Mögliche Fragestellungen zu den ausgewählten Handlungsfeldern.....	31

INHALTSVERZEICHNIS

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	2
TABELLENVERZEICHNIS	3
ABBILDUNGSVERZEICHNIS	4
1 KURZER HINTERGRUND UND PROJEKTVORSTELLUNG	6
1.1 Einleitung	6
1.2 Status Quo	6
1.3 CEWI als Innovationsmotor	7
2 DER AUTOMOBILSEKTOR	11
2.1 Sektor und Wertschöpfung	11
2.2 Rechtliche Rahmenbedingungen	12
2.3 Notwendigkeit für Klimaschutz und Ressourceneffizienz im Sektor	13
2.4 Herausforderungen für die Entwicklung eines nachhaltigen Automobilsektors	14
3 CE-ANSÄTZE IM AUTOMOBILSEKTOR	16
3.1 Schließung der Stoffkreisläufe	16
3.2 Steigerung der Produkt- und Materialeffizienz	21
3.3 Verlängerung der Lebensdauer und effizientere Nutzung der Produkte	23
3.4 Substitution von Rohstoffen und Materialien	26
4 HANDLUNGSFELDER FÜR DAS PROJEKT CEWI	28
5 LITERATURVERZEICHNIS	32

1 KURZER HINTERGRUND UND PROJEKTVORSTELLUNG

1.1 Einleitung

Diese Kurzstudie ist Teil des Verbundvorhabens „Circular Economy als Innovationsmotor für eine klimaneutrale und ressourceneffiziente Wirtschaft (CEWI)“¹ der *Stiftung 2°*, dem *WWF Deutschland* und dem *Wuppertal Institut* und hat zum Ziel, die Potenziale des Automobilssektors und der dazugehörigen Wertschöpfung im Hinblick auf die Umsetzung von zirkulären Ansätzen zu analysieren und den Beitrag zur Ressourceneinsparung und dem Klimaschutz zu bewerten. Das Ergebnis dieser Kurzstudie leitet sich aus einem intensiven Bewertungsprozess verschiedener Maßnahmen-Cluster ab und besteht aus sechs Handlungsfeldern, die ein Potenzial für den Ausbau von Klimaneutralität und Ressourceneffizienz im Automobilssektor aufweisen. Diese Handlungsfelder bilden die Grundlage für den weiteren Projektverlauf von CEWI, in dem Akteure aus der Praxis in Workshops gemeinsam Pilotprojekte modellieren werden.

1.2 Status Quo

Der nachhaltige Umgang mit natürlichen Ressourcen und die Begrenzung des Klimawandels auf deutlich unter 2 Grad stellen gegenwärtig die größten Herausforderungen in Wissenschaft, Wirtschaft, Gesellschaft und Politik dar. Die globale Ressourcennutzung steigt weiterhin dramatisch an: Zwischen 1970 und 2017 ist der Verbrauch um mehr als das Dreifache gestiegen.² Für die Zukunft wird ein weiterer Anstieg prognostiziert, insbesondere bedingt durch die stetige Zunahme der globalen Bevölkerung und der gleichzeitig unveränderten Konsummuster. Die globale Ressourcengewinnung hat sich während der letzten 50 Jahre exponentiell beschleunigt.³ Allein im Jahr 2017 betrug die Menge der globalen Materialgewinnung 92 Milliarden Tonnen und damit "mehr als die dreifache Menge, die 1970 verbraucht wurde".⁴ In diesem Zusammenhang wird eine steigende Anzahl an Umweltproblemen sowie deren zunehmende Komplexität beobachtet. Dazu gehören neben dem Ressourcenverbrauch Problematiken wie Klimawandel, Biodiversitätsverlust und Landnutzungsänderungen.

Als Lösungsansatz wird eine Entkopplung des Ressourcenverbrauchs von der wirtschaftlichen Entwicklung beziehungsweise von der Entwicklung des Wohlstands angesehen.⁵ Eine Strategie zur Erreichung dieses Ziels ist beispielsweise die Steigerung der Ressourceneffizienz⁶. Ein erweiterter Ansatz ist die Circular Economy (folgend CE), welche sich in den letzten Jahren immer stärker etabliert hat.

Die überwiegend lineare Wirtschaftsweise und das damit verbundene enorme Abfallaufkommen stellen Volkswirtschaften weltweit vor massive Herausforderungen, weshalb der Übergang in eine CE stärker forciert wird als jemals zuvor. Mit dem „Programm zur nachhaltigen Nutzung und zum Schutz der natürlichen Ressourcen für Deutschland“ – genannt ProgRes – wurde das Thema auf politischer Ebene in Deutschland verankert.

¹ Weitere Informationen über das Verbundvorhaben finden Sie unter <https://www.cewi-projekt.de>

² Bringezu u.a. 2017.

³ Steffen u.a. 2015.

⁴ Bringezu u.a. 2017.

⁵ Schmidt-Bleek u.a. 1998.

⁶ Greiff; Faulstich 2018.

Eine Leitlinie adressiert in dem Programm das Ziel die „Wirtschafts- und Produktionsweisen in Deutschland schrittweise von Primärrohstoffen unabhängiger zu machen, die Kreislaufwirtschaft weiterzuentwickeln und auszubauen“. Allgemein wird das Konzept der CE als eine wesentliche Strategie angesehen den Rohstoff- und Ressourcenverbrauch wirksam zu senken. Neben dem Recycling sollen Materialien vor allem länger im Wirtschaftszyklus gehalten werden, unter anderem durch Reparatur sowie Wieder- und Weiterverwendung.

Die Politik hat auf europäischer Ebene mit dem Green Deal und auf nationaler Ebene mit Gesetzen wie dem Kreislaufwirtschaftsgesetz oder dem Abfallvermeidungsprogramm damit begonnen die Rahmenbedingungen für eine Kreislaufwirtschaft zu schaffen. Diese ermöglichen jedoch bislang noch keine umfassende Transformation des Systems, da sie derzeit teilweise noch die Umsetzung von konkreten Maßnahmen hemmen. Das derzeitige Steuersystem der Europäischen Union beispielweise erschwert die Entstehung von zirkulären Geschäftsmodellen. So werden Subventionen für die Rohstoff- und Verarbeitungssektoren bereitgestellt, die den Einsatz von Primärrohstoffen begünstigen.⁷ Um den Anreiz zur Förderung einer CE für Unternehmen zu setzen, gilt es den Fokus der Besteuerung auf Naturkapital zu richten. Die Richtlinien müssen europaweit einheitlich etabliert werden, damit es nicht zu Wettbewerbsnachteilen kommt.⁸ Darüber hinaus existieren weitere sektorspezifische Herausforderungen, welche in Kapitel 2.4 näher betrachtet werden.

1.3 CEWI als Innovationsmotor

Für Wirtschaftsakteure bietet die CE verschiedene Vorteile. Auf der einen Seite verweist die *Ellen MacArthur Foundation* beispielweise auf die enormen Kosteneinsparpotenziale, die sich aus innovativen Lösungen zur Abfallvermeidung, Wiederverwendung von Materialien und Neugestaltung von Prozessen ergeben können.⁹ Zusätzlich lassen sich in Europa laut einer Studie von *Material Economics* CO₂-Emissionsreduktionen von etwa 56 Prozent bis zum Jahr 2050 durch die Umsetzung von kreislaufwirtschaftlichen Ansätzen erreichen.¹⁰ Andere Studien schätzen dieses Potenzial sogar noch höher ein: *Stuchtey* (2016) geht davon aus, dass die CO₂-Emissionen bis 2050 zwischen 23 und 60 Prozent gegenüber den aktuellen Entwicklungen reduziert werden können.¹¹ Das Themengebiet der CE ist dabei sehr facettenreich und weitläufig. Es erstreckt sich von der Analyse und Optimierung von Stoffkreisläufen und Materialinputs über diverse Prozessoptimierungs- und Monitoringmaßnahmen im Kontext der Digitalisierung bis hin zur Um- oder Neugestaltung einzelner Produkte, Produktionsprozesse sowie vollständiger Geschäftsmodelle. Aus diesem Grund variieren die Themenschwerpunkte, Anwendungsfelder und Umsetzungsstrategien stark in Abhängigkeit von der jeweiligen Branche.

Vorgehen und Methodik bei CEWI

Zunächst wurde ein Definitionsrahmen für den Automobilsektor gesetzt, eine Übersicht zu bestehenden Aktivitäten erstellt und darauf basierend Handlungsfelder abgeleitet, die einen möglichst hohen Impact in Bezug auf Klimaneutralität und Ressourceneffizienz besitzen. Die nachfolgende Abbildung stellt die Vorgehensweise zusammengefasst dar.

⁷ OECD 2019.

⁸ Wijkman; Skånberg; Berglund 2015.

⁹ Ellen MacArthur Foundation 2016.

¹⁰ Material Economics 2018.

¹¹ Stuchtey 2016.



Abbildung 1: Vorgehensweise

Phase 1: Vorbereitung bildet die Grundlage für die Analyse in Phase 2, die in der Kurzstudie den Hauptbestandteil bildet und als Basis für die Phase 3: Ergebnis und dem weiteren Projektverlauf dient.

In der Wissenschaft und Praxis gibt es derzeit verschiedene Definition und Modelle einer CE, deren Zielsetzungen und zugrunde liegenden Philosophien voneinander abweichen und von denen sich bisher keine „final“ durchgesetzt hat. In **Schritt I** wurden aus diesem Grund das 9R-Modell, das Butterfly Diagramm, das ReSOLVE-Modell und die Material Economics-Modellierung inklusive der enthaltenen Strategien betrachtet. Auf Basis dieser Betrachtung wurden vier CE-Ansätze abgeleitet, welche zum einen die Themen der Modelle abdecken und zum anderen das Verständnis einer CE für CEWI übersichtlich präsentiert. Die für CEWI abgeleiteten CE-Ansätze sind: Schließung der Stoffkreisläufe, Steigerung der Produkt- und Materialeffizienz, Verlängerung der Lebensdauer und effizientere Nutzung der Produkte sowie Substitution von Rohstoffen und Materialien. Diese sollen dazu beitragen relevante Handlungsfelder abzuleiten und Unternehmen dabei zu unterstützen mögliche Maßnahmen in ihrem Handlungsspielraum identifizieren und erstellen zu können. Für jeden der vier Ansätze wurde zudem ein Leitsatz definiert. Abbildung 2 stellt die im ersten Schritt für CEWI abgeleiteten CE-Ansätze und den dazugehörigen Leitsatz dar. Zudem werden die Strategien der betrachteten CE-Modelle den Ansätzen zugeordnet.

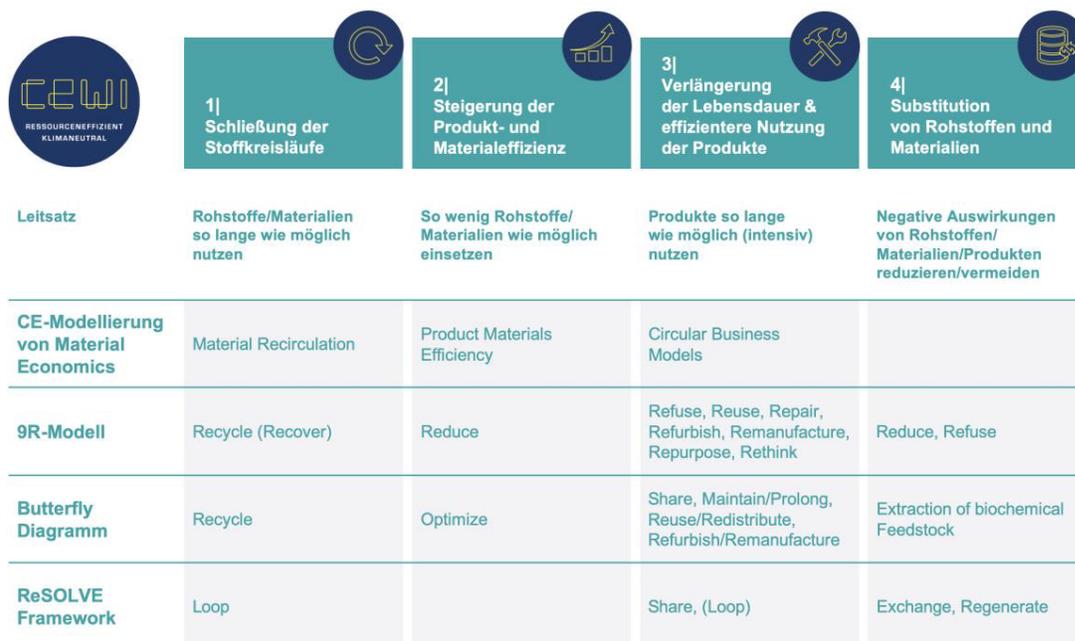


Abbildung 2: Zuordnung der Strategien verschiedener CE-Modelle zu den in der Vorstudie zugrunde liegenden Ansätzen¹²

¹² Material Economics 2018; Buchberger u.a. 2019; Tambovceva; Titko o. J.; Ellen MacArthur Foundation 2015; McKinsey 2016.

In **Schritt II** der ersten Phase findet eine Recherche zu bestehenden Maßnahmen für die einzelnen CE-Ansätze statt. Im Mittelpunkt stehen an dieser Stelle vor allem unternehmerische Aktivitäten, welche sich den zuvor definierten CE-Ansätzen zuordnen lassen und sich in unterschiedlichen Umsetzungsstadien (z. B. Praxisanwendungen, Forschungsprojekten etc.) befinden. Zur Erleichterung der Analyse werden in **Schritt III** diese Maßnahmen innerhalb der CE-Ansätze thematisch geclustert und im weiteren Verlauf bewertet.

In Phase 2 findet die Analyse statt. **Schritt IV** beinhaltet die Bewertung der Maßnahmen-Cluster. Diese werden jeweils hinsichtlich ihrer Chancen und Risiken für die Verwirklichung einer Klimaneutralität und Ressourceneffizienz im Automobilssektor eingeschätzt. Diese Einschätzungen werden mit Hilfe von Ampelfarben anschaulich präsentiert (z. B. grün für hohes, gelb für mittleres und rot für geringes Potenzial). Hinzu kommt die Berücksichtigung allgemeiner (und maßnahmenübergreifender) Hindernisse, die einer Etablierung im Wege stehen beziehungsweise diese erschweren können. Hindernisse können beispielweise regulatorischer oder technischer Natur sein, können aber auch auf Unternehmens- bzw. Konsumentenseite auftreten (z. B. fehlende Datenverfügbarkeit oder geringe Nachfrage). Die der Bewertung zugrunde liegenden Kriterien sind in Abbildung 3 aufgeführt.



Abbildung 3: Bewertungskriterien bzgl. Klimaneutralität, Ressourceneffizienz und allgemeiner Hindernisse

In **Schritt V** und **VI** wird eine abschließende Beurteilung und Ableitung der Cluster vorgenommen. Für den weiteren Projektverlauf werden Handlungsfelder ermittelt, die als Aktionsradius für die Unternehmen dienen. Hier sollen insbesondere Maßnahmen-Cluster ausgewählt werden, die einen hohen Impact sowohl auf Klimaneutralität als auch auf Ressourceneffizienz besitzen. Zur Auswahl der Handlungsfelder werden, zusätzlich zu den bisher erläuterten Chancen und Risiken, zwei weitere Kriterien zur Beurteilung herangezogen: das Entwicklungspotenzial und das Potenzial für Geschäftsmodelle. Für die Bewertung der Potenziale wird ebenfalls auf die Ampelfarben zurückgegriffen. Dies soll eine Beurteilung der Maßnahmen-Cluster bezüglich Umsetzbarkeit und zukünftiger Entwicklungen erlauben sowie die Ableitung der Handlungsfelder in Phase 3 ermöglichen (siehe Abbildung 4).

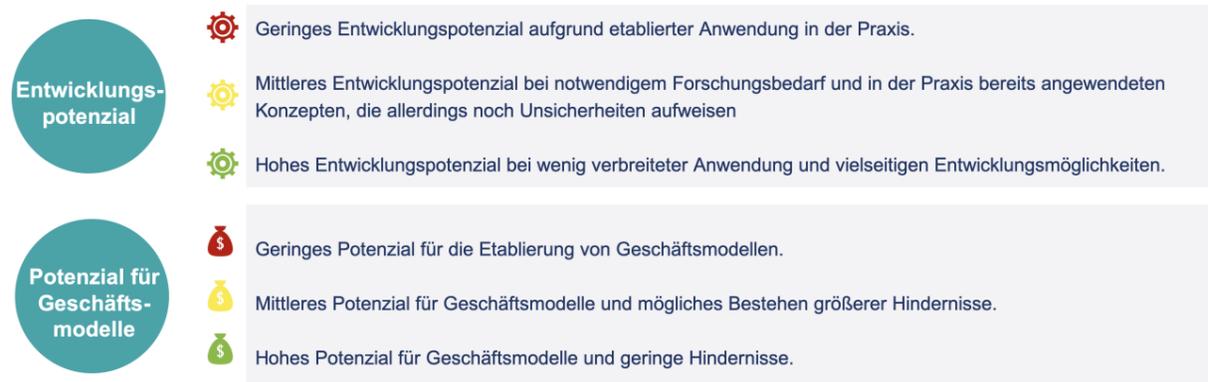


Abbildung 4: Bewertungskriterien nach Entwicklungsstand und Potenzialen für Geschäftsmodelle

Die Ergebnisse der Analyse ermöglichen es daraufhin, die für den weiteren Projektverlauf (mit Blick auf die Workshop-Phase) wesentlichen Handlungsfelder zu identifizieren. Konkret werden Cluster mit einem geringen Entwicklungspotenzial von der weiteren Betrachtung ausgeschlossen. Nach Auswahl der Handlungsfelder wurden Fragestellungen abgeleitet, die für die weitere Zusammenarbeit mit Unternehmen als Ideenanstoß für Pilotprojekte dienen können. Des Weiteren wurden die Wertschöpfungsketten der beiden Sektoren untersucht und wichtige Akteure identifiziert. Diese sollten gewonnen werden, um in der Workshop-Phase des Projekts ambitionierte Ideen zur Umsetzung der Handlungsfelder zu entwickeln. Abbildung 5 fasst die durchgeführten Analyseschritte zusammen.

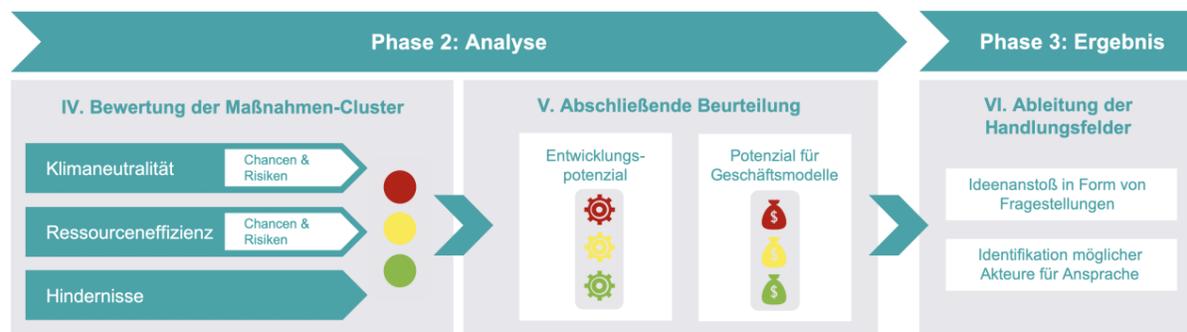


Abbildung 5: Schematische Darstellung – Phase 2: Analyse und Phase 3: Ergebnis

2 DER AUTOMOBILSEKTOR

Der Fokus dieser Kurzstudie liegt auf dem Automobilsektor und den dort möglichen Beiträgen für die Umsetzung einer CE. Dieses Kapitel stellt zunächst einen Überblick über den Sektor und dessen Wertschöpfungskette dar und veranschaulicht darüber hinaus die rechtlichen Rahmenbedingungen, die Notwendigkeit von Klimaschutz und Ressourcenschonung innerhalb des Sektors sowie mögliche Herausforderungen für die Transformation hin zu einer CE.

2.1 Sektor und Wertschöpfung

Um ein Verständnis für die verwendeten Begrifflichkeiten zu erlangen, wird im Folgenden die Definition der Automobilindustrie und des Verkehrssektors dargelegt. Die **Automobilindustrie**¹³ umfasst die Herstellung von Personenkraftwagen (Pkw) sowie die Herstellung von Nutzfahrzeugen. Zu den Nutzfahrzeugen zählen unter anderem leichte Transporter, schwere Lastkraftwagen (LKW) und Busse.¹⁴ Gemäß dem *Verband der Automobilindustrie* (VDA) fallen darunter auch Hersteller von Motoren, Anhängern, Kraftfahrzeug-Teilen (Kfz-Teilen) und Zubehör.¹⁵ Der **Verkehrssektor** bezieht sich auf die Nutzungsphase dieser Industrie und ermöglicht Transportdienstleistungen (Mobilität) von Personen und Gütern.¹⁶ Diese beiden Inhalte werden in der vorliegenden Vorstudie durch den Begriff **Automobilsektor** zusammengefasst. Die nachfolgende Abbildung stellt die traditionelle Wertschöpfungskette des Automobilsektors vereinfacht dar.



Abbildung 6: Vereinfachte Wertschöpfungskette des Automobilsektors

Vereinfacht dargestellt besteht die Wertschöpfungskette des Automobilsektors aus sechs Schritten. Nachdem die Rohstoffe im ersten Schritt abgebaut und anschließend verarbeitet wurden, fertigen die Automobilzulieferer¹⁷ Bauteile und -gruppen (in Form von Normteilen, Komponenten, Systemen und Modulen). Die Komponenten und Module werden dann von den Original Equipment Manufacturer (OEM) zu fertigen Fahrzeugen verarbeitet, die an die Endnutzenden geliefert werden. Während der Nutzungsphase wird zum einen Antriebsenergie (beispielsweise in Form von Benzin) benötigt. Zum anderen sind Dienstleistungen, wie z. B. Versicherungs- und Reparaturleistungen notwendig, um eine langfristige Nutzung zu gewährleisten. In der CEWI Vorstudie wurden insbesondere Maßnahmen betrachtet, die sich auf die Kernschritte der Wertschöpfungskette beziehen. Nicht Gegenstand der Betrachtung ist die energetische Verwertung sowie die Bereitstellung der Antriebsenergie während der Nutzungsphase. Am Ende der Lebensdauer wird das Fahrzeug außer Betrieb

¹³ Synonym verwendete Begriffe sind u.a. Automobilwirtschaft und Automobilbranche

¹⁴ Bundesministerium für Wirtschaft und Energie o. J.

¹⁵ O. V. 2009

¹⁶ O. V. o. J.; Hütter 2013.

¹⁷ In der Praxis werden diese Zulieferbetriebe in drei Gruppen klassifiziert, die für die Herstellung unterschiedlicher Fahrzeugteile verantwortlich sind. Unterteilt werden die Produkte in Normteile, Komponenten und Module. Die Phase 3 beinhaltet alle.

genommen und die privaten Endverbrauchernden müssen nachweisen können, das Altfahrzeug rechtmäßig entsorgt zu haben (verpflichtend). Hierbei ist die Rückgabe beim OEM sowie direkt beim Demontagebetrieb zulässig. Der Demontagebetriebe übernimmt dann die sogenannte „Trockenlegung“ der Fahrzeuge und den Ausbau der Bauteile. Dadurch können Ersatzteile und aufbereitete Rohstoffe wiederverwendet werden. Nicht recycelbare Teile werden der energetischen Verwertung zugeführt.¹⁸

Die Komplexität der Wertschöpfungskette entsteht vor allem dadurch, dass ein moderner Pkw aus mehreren zehntausend Einzelteilen besteht, die von unterschiedlichen Zuliefererbetrieben hergestellt werden. Somit sind mehrere tausend Akteure an der Produktion eines Fahrzeugs beteiligt.¹⁹

2.2 Rechtliche Rahmenbedingungen

Für den Automobilsektor gibt es eine Vielzahl von Regulierungen, die die Entwicklung zu einer nachhaltigen Mobilität unterstützen.

Übergeordnet soll der Europäische Green Deal dazu beitragen, den Verkehrssektor in naher Zukunft klimafreundlich zu gestalten. Hierzu ist künftig eine Strategie für eine nachhaltige und intelligente Mobilität geplant.²⁰ Die nachfolgende Abbildung stellt einen Auszug relevanter Verordnungen, Richtlinien und Gesetze im Bereich CE und Klimaschutz, sowohl auf EU-Ebene als auch auf nationaler Ebene, dar und erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit bezüglich existierender Verordnungen, Richtlinien und Gesetze. Da sich CEWI sowohl mit CE als auch Klimaschutz befasst, befindet sich das Projekt an der Schnittstelle beider Aspekte.

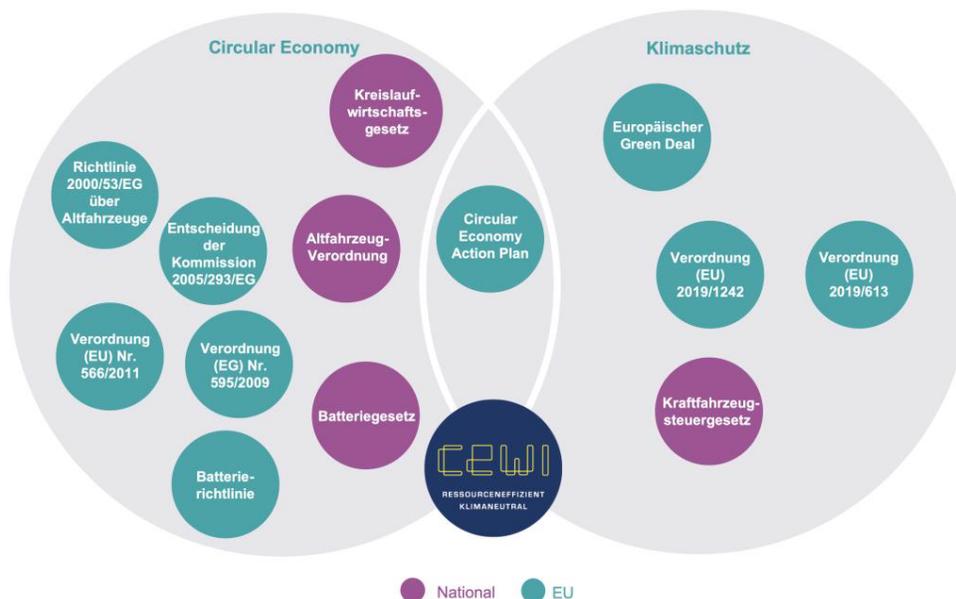


Abbildung 7: Übersicht der rechtlichen Rahmenbedingungen im Automobilsektor

Die Richtlinie 2000/53/EG, die Entscheidung der Kommission 2005/293/EG, sowie die Altfahrzeug-Verordnung

¹⁸ Tappeser; Chichowitz 2017.

¹⁹ Müller; Kerkow 2014.

²⁰ Europäische Kommission 2020; 2019.

behandeln unter anderem die Überlassung, Rücknahme und umweltverträgliche Entsorgung von Altfahrzeugen²¹. Gegenstand sind insbesondere Regelungen zur der Rücknahme, die Festlegung von Wiederverwendungs-/ Recyclingquoten (85 Prozent) beziehungsweise Wiederverwendungs-/ Verwertungsquoten (95 Prozent), sowie die Verpflichtung der Datenübermittlung an die Europäische Kommission. Die Verordnungen (EU) Nr. 566/2011 und (EG) Nr. 595/2009 behandeln den Zugang zu Reparatur- und Wartungsinformationen für Fahrzeuge.

Die Batterierichtlinie (Richtlinie 2006/66/EG) auf EU-Ebene sowie das Batteriegesetz (BattG2) auf nationaler Ebene behandeln das Inverkehrbringen, die Rücknahme und die umweltverträgliche Entsorgung von Batterien und Akkumulatoren. In der aktuellen europäischen Richtlinie fehlen jedoch Sammelziele für Lithium-Ionen-Batterien (LIBs). Durch die derzeitige Überarbeitung der Batteriegesetzgebung sowohl auf europäischer als auch auf nationaler Ebene wird dieser Thematik nachgekommen. Neben der Definition neuer Sammel- und Recyclingquoten sind im BattG2 neue Registrierungsverpflichtungen, Kosten durch Gebühren und Entsorgungsaufwände sowie weitere Änderungen erkennbar.²²

Im Bereich des Klimaschutzes ist insbesondere die Verordnung (EU) 2019/631 von Relevanz. Diese legt die sogenannten CO₂-Flottengrenzwerte (in g CO₂/km)²³ für Pkw und leichte Nutzfahrzeuge fest. Ermittelt werden diese Werte durch das WLTP-Prüfverfahren²⁴. Für schwere Nutzfahrzeuge gilt hierfür die Verordnung (EU) 2019/1242.²⁵

Des Weiteren wird der Klimaschutz im Automobilsektor durch das KraftStG 2002, das Kraftfahrzeugsteuergesetz, unterstützt. Ab dem 1. Januar 2021 tritt die siebte Änderung des Gesetzes in Kraft. Diese setzt deutliche Anreize für innovative und klimaschonende Mobilität. Die Steuerbemessung von neu zugelassenen Pkw wird stärker an deren CO₂-Emissionen gebunden. Zusätzlich werden emissionsarme Pkw begünstigt. Bereits zugelassene Pkw betrifft diese Änderung nicht.²⁶

2.3 Notwendigkeit für Klimaschutz und Ressourceneffizienz im Sektor

Nach Betrachtung der Wertschöpfungskette des Automobilsektors sowie der rechtlichen Rahmenbedingungen stellt sich die Frage aus welchen Gründen eine Notwendigkeit für Klimaschutz und Ressourceneffizienz im Sektor besteht. Die Automobilindustrie gehört in Deutschland zu den bedeutendsten Wirtschaftszweigen. Mit einer Bruttowertschöpfung von 105,18 Milliarden Euro pro Jahr liegt der Automobilsektor an sechster Stelle der gesamten gewerblichen Wirtschaft²⁷ und beschäftigt in Deutschland über 820.000 Menschen (Stand 2018).²⁸

²¹ Definition Altfahrzeuge: Pkw sowie Lkw, dessen Nutzungsphase beendet sind. (Wilts 2018.)

²² hesselmann service GmbH 2020.

²³ Der Flottengrenzwert ist so definiert, dass im Durchschnitt alle in der EU in einem Jahr zugelassenen Fahrzeuge diesen Wert nicht überschreiten dürfen. Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass nicht jedes einzelne Auto den festgelegten Grenzwert einhalten muss.

²⁴ Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure (WLTP).

Für die Ermittlung des Kraftstoffverbrauchs werden bei diesem Verfahren auf Grundlage weltweit gesammelter Fahrdaten realitätsnahe Autofahrten simuliert, indem neben der Geschwindigkeit und dem Bremsverhalten auch weitere Faktoren wie Ausstattung, variierendes Fahrzeuggewicht, Reifendruck u.ä. berücksichtigt werden. Das WLPT ist somit deutlich realitätsnäher als das NEFZ, ermittelt jedoch auch entsprechend höhere Werte für den Kraftstoffverbrauch und den damit verbundenen CO₂-Austoß. (Chmielewski o. J.)

²⁵ Europäische Union 2019.

²⁶ Bär; Runkel; Schlichter 2020; Bundesfinanzministerium o. J.; Wittich; Harloff 2020.

²⁷ ZWE 2020; Statista 2020.

²⁸ Statista 2021.

Mit Blick auf die Exportumsätze Deutschlands ist er sogar der zweitwichtigste Wirtschaftszweig.²⁹ Dazu kommt eine sehr ressourcen- und treibhausgasintensive Wertschöpfungskette. So verbrauchte die Automobilindustrie im Jahr 2018 ca. 10,6 Millionen Tonnen Stahl, eine Million Tonnen Aluminium, 108.000 Tonnen Kupfer, 47.600 Tonnen Zink sowie 292.000 Tonnen Blei.³⁰

Neben dem Ressourcenverbrauch sind auch die Treibhausgas-Emissionen (THG-Emissionen) des Automobilssektors signifikant. Die weltweiten THG-Emissionen der Automobilindustrie betragen im Jahr 2018 rund 4,8 Gigatonnen CO₂. Das entspricht etwa 9 Prozent der gesamten weltweiten CO₂-Emissionen.³¹ Neben der Automobilindustrie ist der Verkehrssektor für hohe CO₂-Emissionen verantwortlich, die 2020 bei 166 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalenten lagen.³² Zwar sanken die kilometerbezogenen beziehungsweise spezifischen CO₂-Emissionen³³ in Deutschland im Durchschnitt, jedoch hat sich im selben Zeitraum das Verkehrsaufkommen erhöht. Insgesamt kam es damit zu einem Anstieg der absoluten Emissionen.³⁴ Hinzu kommt die ineffiziente Auslastung von Pkw in Deutschland: Ein Pkw wird durchschnittlich nur 3 Prozent der Zeit genutzt, die restlichen 97 Prozent steht er still.³⁵

Aufgrund der ressourcen- und treibhausgasintensiven Wertschöpfungskette, der langen Lebensdauer von Fahrzeugen sowie dem hohen Stellenwert des Automobilssektors in Deutschland existieren ausreichend Gründe, den Sektor aus der Perspektive der CE zu betrachten. Darüber hinaus besitzt die deutsche Automobilindustrie weltweit einen hohen Stellenwert insbesondere durch die Herstellung von rund 80 Prozent aller im Premiumsegment weltweit verkauften Autos und kann hierdurch eine erhebliche Vorbildfunktion einnehmen. Auch die starke Vernetzung des Sektors in der Politik und den Industrieverbänden ist vorteilhaft, wenn über ökologische und soziale Regulierungen im Rohstoffsektor diskutiert wird.

2.4 Herausforderungen für die Entwicklung eines nachhaltigen Automobilssektors

Der richtige Einsatz und die richtige Umsetzung der CE-Ansätze und Maßnahmen sind für die gewünschte Wirkung von großer Bedeutung, teilweise erschweren die gesetzlichen und regulatorischen Rahmenbedingungen allerdings die Etablierung dieser Ansätze. Im Folgenden werden die bei der Recherche identifizierten zentralen Herausforderungen beschrieben. Diese sollen als Einblick dienen und bilden keine vollumfängliche Analyse.³⁶

Eine wesentliche Herausforderung im Automobilssektor, insbesondere für die Etablierung eines geschlossenen Stoffkreislaufes, besteht hinsichtlich des **Exports von Altfahrzeugen**. Im Jahr 2017 wurden 5,7 Millionen Tonnen Altfahrzeuge aus der EU exportiert.³⁷ Auf Deutschland bezogen wurden im Jahr 2016 410.000 von 2,88 Millionen Pkw in Deutschland recycelt, womit lediglich 15 Prozent des gesamten Abfallstroms der Fahrzeuge in Deutschland

²⁹ Wagner 2020.

³⁰ Elsner u. a. 2019. Angaben zum Zinkverbrauch: Verbrauch für das Jahr 2016. Interne WI-Abschätzung (im Rahmen des DownMet Projektes vom UBA)

³¹ Stephan; Lee; Kim 2019.

³² Umweltbundesamt 2020a; VerkehrsRundschau 2020.

³³ Durchschnittliche Verringerung der kilometerbezogenen bzw. spezifischen CO₂-Emissionen (Referenzwert 1990), bei Pkw um ca. 9 Prozent, bei Lkw um ca. 33 Prozent (Umweltbundesamt 2020c.)

³⁴ Umweltbundesamt 2020a; VerkehrsRundschau 2020.

³⁵ infas, DRL und IVT 2019.

³⁶ Kein Anspruch auf Vollständigkeit gegeben.

³⁷ Eurostat 2020.

verblieben ist.³⁸ In vielen Ländern, in die die Altfahrzeuge exportiert werden, gibt es keine ausreichenden Demontage- und Recyclingkapazitäten. Dies führt nicht nur zu lokalen Umwelt- und Gesundheitsproblemen, sondern auch zum dauerhaften Verlust wertvoller Rohstoffe.³⁹ In den Ländern, in denen die Altfahrzeuge verbleiben, werden häufig nur die wertvollsten Komponenten wie z. B. der Katalysator entnommen und Flüssigkeiten wie Öl oder Benzin gelangen schlimmstenfalls in die Umwelt.⁴⁰ Nationale Umweltstandards können demnach durch den Export der Fahrzeuge umgangen werden.⁴¹

Eine weitere Herausforderung bilden **Rebound-Effekte**, die dazu führen, dass erwartete Einsparungen beim Energie- oder Ressourcenverbrauch nur teilweise oder gar nicht eintreten. Bezogen auf den Automobilssektor besteht beispielsweise beim Car-Sharing das Risiko, dass die Nutzung von Rohmaterialien nicht sinkt, weil die gemeinschaftlich genutzten Fahrzeuge durch eine höhere Auslastung eine kürzere Lebensdauer aufweisen beziehungsweise frühzeitig aus dem Verkehr gezogen werden (direkter Rebound-Effekt). Außerdem besteht die Möglichkeit, dass die Konsument:innen die Ersparnisse, die sie durch Car-Sharing erzielen, in klimaschädliche Aktivitäten wie z. B. Flugreisen reinvestieren (indirekter Rebound-Effekt).⁴²

Technologische Herausforderungen bestehen im Automobilssektor insbesondere beim Recyclingprozess. In fast allen Fahrzeugen werden die Metalle Aluminium, Kupfer und Stahl eingesetzt. Bei den Recyclingverfahren dieser Materialien kommt es häufig zum sogenannten **Downcycling** was bedeutet, dass der wiederverwertete Rohstoff nicht die Qualität eines primären Rohstoffes besitzt. Dies geschieht häufig dadurch, dass beim Schreddern der Fahrzeuge Kupfer und Stahl beziehungsweise verschiedene Aluminiumlegierungen miteinander vermischt werden und somit deren Wiederverwendung beeinträchtigt wird. Insbesondere der Wiedereinsatz der Materialien für die Automobilindustrie ist dadurch häufig nicht mehr möglich.⁴³ Auch im Bereich der Kunststoffe und Shredder-Leichtfraktionen stellt die Verunreinigung und die Vermischung verschiedener Kunststoffarten eine große Herausforderung dar und führt durch den Qualitätsverlust zu Downcycling. Außerdem bestehen Fahrzeuge aus bis zu einem Prozent aus sogenannten seltenen Erden. **Seltene Erden** gehören zu den von der Europäischen Kommission als besonders „kritisch“ eingestufte Metalle. Diese sind in ihrer Nutzung besonders wichtig und liegen standardmäßig nur in sehr geringen Konzentrationen in der Erdkruste vor, sodass sich eine wirtschaftliche Förderung nur in wenigen Gebieten rechnet. Zudem führt die geringe Konzentration im Anreicherungsprozess zu großen Umweltbelastungen.⁴⁴ Es ist daher von großer Bedeutung, dass Seltene Erden den Stoffkreislauf nicht verlassen. Derzeit werden jedoch weniger als ein Prozent dieser Elemente recycelt: Grund dafür ist die unzureichende Rückgewinnung aus Produkten sowie die aufwendige Trennung der Elemente.⁴⁵

³⁸ Wilts 2018.

³⁹ Umweltbundesamt 2020a.

⁴⁰ Wilts 2018.

⁴¹ Wilts 2018.

⁴² OECD 2019b.

⁴³ Material Economics 2018.

⁴⁴ Schüler 2011.

⁴⁵ Bundesverband Sekundärrohstoffe und Entsorgung o. J.; Material Economics 2018.

3 CE-ANSÄTZE IM AUTOMOBILSEKTOR

Die folgenden Kapitel beschäftigen sich im Detail mit den in Kapitel 1 vorgestellten CE-Ansätzen. Dabei wird für jeden Ansatz zunächst eine allgemeine Beschreibung dargelegt. Im Anschluss werden die aus dem jeweiligen Ansatz abgeleiteten Maßnahmen-Cluster vorgestellt und bezüglich deren Beitrag zur Klimaneutralität und Ressourceneffizienz im Automobilsektor bewertet. Außerdem werden allgemeine Hindernisse, sowie das Entwicklungspotenzial und die Potenziale für Geschäftsmodelle hervorgehoben.



Abbildung 8: CE-Ansätze und deren Leitsätze

3.1 Schließung der Stoffkreisläufe

Das heutige Wirtschaftssystem ist auf einen Zufluss von neuen Ressourcen angewiesen. Das Ziel der Schließung der Stoffkreisläufe besteht darin, diesen Zufluss zu eliminieren beziehungsweise stark zu reduzieren.⁴⁶ Hierbei sollten die verwendeten Rohstoffe möglichst lange im Kreis geführt und für die Herstellung neuer Produkte eingesetzt werden. Realisiert wird dies durch Rückführung, Aufbereitung und Wiederverwendung von Materialien. Ziel ist es, ein hohes Recyclingniveau zu erreichen, um den Qualitätsverlust gering zu halten und ein Downcycling weitestgehend zu vermeiden.⁴⁷ Für den Automobilsektor sind die folgenden Themen zur Schließung der Stoffkreisläufe von besonderer Bedeutung:

- Recycling von sortenreinen Produktionsabfällen,
- Recycling von End-of-Life Fahrzeugen inklusive Altfahrzeugverwertung,
- Design-for-Recycling – Steigerung der hochwertigen Verwertung von Altfahrzeugen, unter anderem durch recyclingorientierte Konstruktion, und Minimierung des Downcycling, unter anderem durch hochwertigere Aufbereitung sowie
- Steigerung des Rezyklateinsatzes.

Dieser CE-Ansatz kann im Automobilsektor in zehn unterschiedliche Cluster eingeteilt werden, die jeweils Maßnahmen mit ähnlichen Zielsetzungen vereinen. In der nachfolgenden Abbildung werden die in der Studie untersuchten Maßnahmen-Cluster vorgestellt. Diese Auflistung bietet keine Gewähr auf Vollständigkeit.

⁴⁶ Ellen MacArthur Foundation 2015a.

⁴⁷ Material Economics 2018.

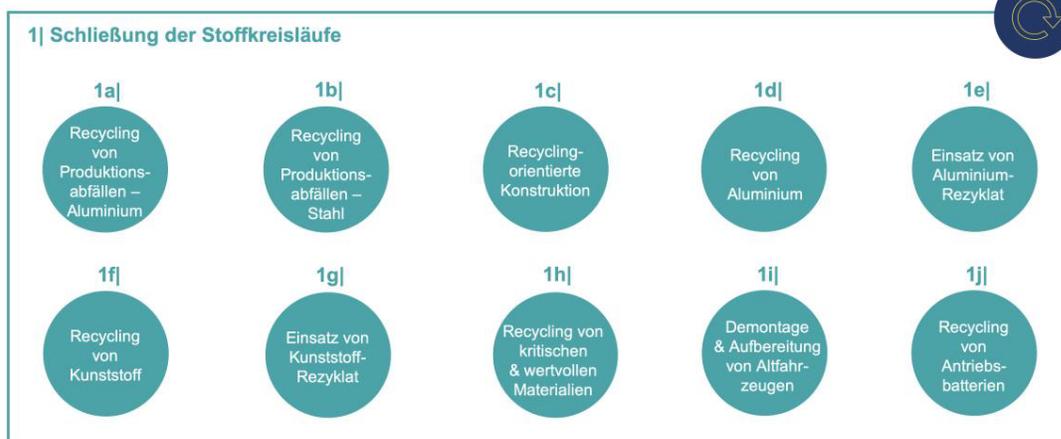


Abbildung 9: Maßnahmen-Cluster zum CE-Ansatz Schließung der Stoffkreisläufe

Die ersten beiden Cluster können zu **Recycling von Produktionsabfällen** (Aluminium (1a) und Stahl (1b)) zusammengefasst werden. Hierbei werden die Abfälle, die bei der Produktion anfallen (beispielsweise Aluminiumblechteile und Aluminiumspäne beziehungsweise Stahlblechschnitt) durch geeignete Recyclingverfahren aufbereitet und wieder dem Produktionsprozess zugeführt. Die beiden Maßnahmen-Cluster besitzen ein hohes Potenzial in der Umweltwirkung (Klima- und Ressourcenschutz)⁴⁸ sowie keine relevanten Hindernisse, die einer Umsetzung entgegenstehen. Der Vorteil bei dieser Art von Recycling ist die sortenreine Verfügbarkeit und die Reinheit der Materialien. Allerdings wurde das Entwicklungspotenzial gering eingestuft, da die Maßnahmen bereits in der Praxis durch eine Vielzahl der Unternehmen umgesetzt werden.

Das Cluster **Recyclingorientierte Konstruktion** (1c) erleichtert ein hochwertiges Recycling und trägt dazu bei, die Altfahrzeugverwertung (insbesondere den Aufbereitungs- und Recyclingprozess) zu verbessern und zu erleichtern. Die Umsetzung kann z. B. durch die ISO-Kennzeichnung aller Kunststoff-Bauteile erfolgen. Dies reduziert die Anzahl notwendiger Arbeitsschritte, spart Energie und stärkt eine Kreislaufführung der Materialien. Risiken bestehen in Bezug auf die Ressourceneffizienz darin, dass Verluste auftreten können und unter Umständen ein Downcycling stattfindet. Die bisherige fehlende flächendeckende Umsetzung von recyclingorientierten Konstruktionen lässt ein hohes Entwicklungspotenzial vermuten und ist im Moment insbesondere durch fehlende einheitliche Vorgaben für die Unternehmen und das ungenaue Wissen über zukünftige Entsorgungstechniken zu begründen.

Insgesamt weisen die Cluster **Recycling von Aluminium** (1d) und **Einsatz von Aluminium-Rezyklat** (1e) ein hohes Potenzial bezogen auf die Umweltwirkung auf. Zum Einschmelzen von gebrauchtem Aluminium werden nur fünf Prozent der Energie benötigt, die zur Ersterzeugung des Metalls erforderlich ist. Die mögliche Energieeinsparung von bis zu 95 Prozent stellt somit bezüglich der Chance auf Klimaneutralität ein hohes Potenzial dar. Jedoch besteht ein großer Unterschied zwischen Aluminium-Guss⁴⁹ und Aluminium-Knetlegierungen⁵⁰. Aluminium-Knetlegierungen lassen sich nur aus Schrott herstellen bei dem die Zusammensetzung bekannt ist (beispielsweise bei sortenreinen Produktionsabfällen), da man das Rezyklat

⁴⁸ Bei Recycling von Produktionsabfällen – Stahl (1b) wurde ein mittleres Potenzial bzgl. der Chancen sowohl bei Klimaneutralität als auch Ressourcenschutz eingeschätzt, da durch ggfs. notwendige Aufbereitung weniger Energie eingespart werden kann und keine genaueren Daten bei der Literaturrecherche gefunden wurden.

⁴⁹ Im Automobilssektor kommt Aluminium-Guss bspw. für die Herstellung des Motorblocks zum Einsatz.

⁵⁰ Karosserien werden überwiegend aus Aluminium-Knetlegierungen hergestellt.

nur noch durch Gießen in Form bringen kann (Kaltformgebung). Aluminium-Schrotte in denen Aluminium-Knetlegierungen enthalten sind, lassen sich jedoch recyceln und werden für die Herstellung von Aluminium-Gussteilen eingesetzt. Möglich ist dies, da der (zulässige) Silizium-Anteil in Aluminium-Gussteilen höher ist. Auch die Schredderabfälle werden für die Herstellung von Aluminium-Guss verwendet. Basierend auf diesen Informationen wird die Chance für Ressourceneffizienz mit einem hohen Potenzial eingeschätzt, weil hier eine Kreislaufführung möglich ist. Ein Risiko besteht allerdings aufgrund der dissipativen Verluste im Herstellungsprozess. Die beschriebene Vorgehensweise ist gängige Praxis und spiegelt sich in der in Tabelle 1 (siehe S. 21) vorgenommenen Einschätzung eines geringen Entwicklungspotenzial wider. Insbesondere im Automobilssektor steigt der Einsatz von Aluminium stetig, sodass dort der Aluminiumbedarf höher ist als die mögliche Rezyklatherstellung. Dies führt zu einigen Hindernissen. Zudem führen die Rahmenbedingungen im Automobilssektor dazu, dass durch die hohen Anforderungen an Qualität nicht jedes Rezyklat eingesetzt werden kann beziehungsweise der Bedarf an Aluminium-Guss durch die steigende Nachfrage nach elektrobetriebenen Fahrzeugen zukünftig sinken könnte. Noch ist dieses Thema allerdings nicht akut, die Nachfrage sowohl für Aluminium-Knetlegierungen als auch -Guss wachsen weiter, zudem weisen die Produkte des Automobilssektors eine lange Nutzungsdauer auf. Bis das Problem also wirklich auftritt, haben sich eventuell andere Abnehmer für das Sekundär-Aluminium gefunden, z. B. im Maschinenbau.

Das Maßnahmen-Cluster **Recycling von Kunststoff** (1f) umfasst die Verwertung von Kunststoffabfällen zu hochwertigem Granulat, um daraus wieder neue Komponenten herzustellen. Laut *Material Economics* können bis zu zwei Tonnen CO₂ pro Tonne Kunststoff eingespart werden, sodass für das Cluster ein hohes Potenzial für Klimaneutralität vorhanden ist.⁵¹ Jedoch ist die Höhe der Einsparung abhängig vom Recyclingprozess. Das Potenzial der Ressourceneffizienz ist stark von der jeweiligen Kunststoffart abhängig. Durch die Vielfalt an unterschiedlichen Kunststoffen besteht das Risiko der Vermischung von Materialien, was wiederum zu Qualitätseinbußen beim Recyclingprozess führt. Ein mittleres Potenzial für die Schließung der Stoffkreisläufe im Automobilssektor ist jedoch vorhanden, insbesondere da die Menge für die Wiederverwendung zurückgewonnener Kunststoffe jedes Jahr steigt.⁵² Hindernisse bestehen hinsichtlich der hohen Qualitätsanforderung der Materialien.

Der **Einsatz von Kunststoff-Rezyklat** (1g) erfolgt bereits in vielen nicht sicherheitsrelevanten Bauteilen wie z. B. Radhausschalen und ist auch für Kleinteile und weitere nicht sicherheitsrelevante Bauteile wie beispielsweise Dämmmatten möglich. Damit liegt hier ein mittleres Entwicklungspotenzial vor. Zudem können abhängig vom Recyclingprozess und der Kunststoffart CO₂-Emissionen reduziert werden. Darüber hinaus weist der Einsatz von Kunststoff-Rezyklat die gleichen Ressourceneffizienz-Risiken und allgemeine Hindernisse auf wie das Recycling von Kunststoffen.

Das Cluster **Recycling von kritischen und wertvollen Materialien** (1h) umfasst insbesondere die Betrachtung seltener Materialien wie Gold, Silber, Kupfer, Platin, Palladium, Tantal und Neodym, die vor allem in den Bordcomputern und den Katalysatoren von Fahrzeugen vorkommen. Ihr Recycling führt indirekt zur Einsparung von CO₂-Emissionen, da lange Transportwege für sonst notwendige Importe entfallen. Da der Abbau dieser Metalle zudem überwiegend in geopolitisch instabilen Regionen stattfindet, wird es in Zukunft wichtiger werden, diese Materialien im Kreislauf zu führen. Langfristig wird so eine Unabhängigkeit von Importen möglich. Prinzipiell ist eine Kreislaufführung dieser Materialien möglich. Da die Mengen an seltenen und kostbaren Metallen in einem Auto im Vergleich beispielsweise zur Stahlmenge sehr gering sind und vom eingesetzten Material abhängen, ist im Bezug auf die Ressourceneffizienz nur ein geringes Potenzial vorhanden. Das Recycling von Edelmetall (wie Gold, Silber, Platin und Palladium) ist technologisch möglich, wohingegen das Recycling von Neodym, dass unter anderem für die Herstellung von Magneten verwendet wird, sehr aufwendig ist, da es sich hierbei um eine extrem

⁵¹ Material Economics 2018.

⁵² Knaufindustries Automotive 2020.

festen chemischen Bindungen handelt. Der hohe Aufwand für die Rückgewinnung der Metalle und der niedrige Erlös (beziehungsweise die fehlende Preiswahrheit der Primärmaterialien) sind vorliegende Hindernisse, die bisher einer Umsetzung entgegenwirken. Insgesamt ist ein geringes Potenzial vorhanden, dass durch material- oder bauteilspezifische Verwertungsquoten steigerungsfähig ist.

Das Cluster **Demontage und Aufbereitung von Altfahrzeugen** (1i) weist insgesamt ein hohes Potenzial auf, wobei die Umsetzung durch die unzureichende Rückführung und Nachverfolgbarkeit seitens der Herstellenden das derzeit größte Hindernis darstellt. Zudem verbleibt nur ein geringer Teil der jährlich rund drei Millionen endgültig außer Betrieb gesetzten Fahrzeuge (Pkw und leichte Nutzfahrzeuge) als Altfahrzeuge in Deutschland. Rund 2,4 Millionen Fahrzeuge wurden 2018 als Gebrauchtfahrzeuge exportiert, was zu einem endgültigen Verlust an wertvollen Ressourcen führt.⁵³ Auf der anderen Seite kann eine hochwertige Verwertung von Altfahrzeugen zu einer Einsparungen von CO₂-Emissionen führen und unterstützt die Schließung von Stoffkreisläufen, da ein Großteil der Materialien im Kreislauf verbleiben.⁵⁴ Risiken bestehen insbesondere durch eine mögliche Kompensation der CO₂-Einsparungen durch den Energiebedarf des Aufbereitungs- und Recyclingprozesses und der gegebenenfalls hohe Aufwand für die Rückführung der Fahrzeuge sowie die Recyclingfähigkeit verschiedener Materialien. Das Potenzial der Kreislaufführung wird vermindert durch den dauerhaften Verlust wertvoller Rohstoffe. Massenmetalle wie Stahl oder Kupfer werden zurückgewonnen, strategische Metalle gehen jedoch durch konventionelle Behandlungsmethoden verloren.

Die bisher bewerteten Maßnahmen-Cluster sind sowohl für Verbrennungsmotoren als auch Fahrzeuge mit alternativen Antrieben von Bedeutung. Das letzte Maßnahmen-Cluster **Recycling von Antriebsbatterien** (1j) hingegen betrifft nur Fahrzeuge mit elektrischen Antrieben. Der Wiederverwertung der Antriebsbatterie wird eine hohe Relevanz zugeschrieben, da die Batterien meist eine geringere Lebensdauer als die Karosserie aufweisen. Batterien, die nicht mehr genug Leistung für Fahrzeuge aufbringen, aber noch nicht technisch defekt sind, könnten in ihrem „Second Life“ als stationäre Speicher für z. B. Schnellladesäulen verwendet werden. Leistungsunfähige Batterien können hingegen in verschiedenen Recyclingprozessen in ihre metallischen Bestandteile aufgeteilt werden, welche dann wiederverwendet werden können. Defekte Batterien gelten als hochgefährlich, da es zum Austreten giftiger Gase kommen kann oder Explosionsgefahr besteht, und müssen deshalb als Sondermüll entsorgt werden. Ein Recycling ist daher nur unter hohen Sicherheitsvorkehrungen möglich.⁵⁵ Die Klimaneutralität des Clusters weist ein mittleres Potenzial auf, da das Recyclingverfahren weniger energieintensiv als die Primärherstellung ist.⁵⁶ Eine Kompensation der CO₂-Einsparungen ist jedoch durch den hohen Energiebedarf bei der Rohstoffrückgewinnung, besonders durch das Einschmelzen, möglich. Dahingegen besteht ein hohes Potenzial für die Ressourceneffizienz und die Erhöhung der Kreislaufführung, da bis zu 95 Prozent der relevanten Funktionsmaterialien, Kobalt, Nickel und Kupfer, zurückgewonnen werden können.⁵⁷ Auch die Rückgewinnung von Lithium ist technisch möglich, wegen der niedrigen Rohstoffpreise für Primärmaterial derzeit allerdings unwirtschaftlich. Die Kreislaufführung wird durch die Tatsache erschwert, dass es eine Vielzahl unterschiedlicher Batterietypen auf dem Markt gibt, sodass kein einheitlicher Recyclingprozess möglich und das Verwerten der Batterien zeitaufwendig und teuer ist. Da das Batterie-Recycling noch nicht an dem Punkt angelangt ist, an dem sich der Verzicht auf Primärrohstoffe ökonomisch lohnt, stellt die Wirtschaftlichkeit des Batterie-Recyclings (vor

⁵³ Umweltbundesamt 2020b.

⁵⁴ AIMPLAS 2020; BMW AG 2009; Volkswagen AG o. J.

⁵⁵ Schulz 2020.

⁵⁶ Bei dem Unternehmen Duesenfeld werden durch das Recyclingverfahren 8,1 Tonnen CO₂/t recycelter Batterie im Vergleich zur Primärgewinnung der Rohstoffe eingespart. Die Höhe der prozentualen Einsparung ist nicht bekannt, sodass weiterhin von einem mittleren Potenzial bzgl. der Klimaneutralität ausgegangen wird.

⁵⁷ Volkswagen AG 2019.

allem Recycling und Rückgewinnung von Lithium) ein großes Hindernis dar.⁵⁸ Außerdem ist bisher noch keine ausreichende Sammlungs- und Wiedergewinnungs-Infrastruktur etabliert.⁵⁹ Es besteht ein mittleres Entwicklungspotenzial, da die Thematik des Recyclings von Antriebsbatterien bereits auf EU-Ebene diskutiert wird und Gegenstand vieler Initiativen ist.

Nachfolgend fasst Tabelle 1 die Bewertung der Maßnahmen-Cluster zusammen. Die Bewertung bezieht sich auf den gegenwärtigen Stand der Literatur zu den einzelnen Clustern und nicht auf konkrete Technologien. Deren Einschätzung kann in Bezug auf einzelne Bewertungskriterien abweichen.

1 Maßnahmen-Cluster	Klimaneutralität		Ressourceneffizienz		Hindernisse	Entwicklungs- potenzial	Potenzial für Geschäfts- modelle
	Chancen	Risiken	Chancen	Risiken			
1a Recycling von Produktionsabfällen bei Aluminium	●	●	●	●	●	⚙️	💰
1b Recycling von Produktionsabfällen bei Stahl	●	●	●	●	●	⚙️	💰
1c Recycling-orientierte Konstruktion	●	●	●	●	●	⚙️	💰
1d Recycling von Aluminium	●	●	●	●	●	⚙️	💰
1e Einsatz von Aluminium-Rezyklat	●	●	●	●	●	⚙️	💰
1f Recycling von Kunststoff	●	●	●	●	●	⚙️	💰
1g Einsatz von Kunststoff-Rezyklat	●	●	●	●	●	⚙️	💰
1h Recycling von kritischen und wertvollen Materialien	●	●	●	●	●	⚙️	💰
1i Demontage und Aufbereitung von Altfahrzeugen	●	●	●	●	●	⚙️	💰
1j Recycling von Antriebsbatterien	●	●	●	●	●	⚙️	💰

Tabelle 1: Bewertung der Maßnahmen-Cluster zum CE-Ansatz Schließung der Stoffkreisläufe

⁵⁸ Schulz 2020.

⁵⁹ Buruzs; Torma 2018.

3.2 Steigerung der Produkt- und Materialeffizienz

Der Schwerpunkt bei dem Ansatz Steigerung der Produkt- und Materialeffizienz liegt auf der Reduktion des Materialeinsatzes bei Bereitstellung der gleichen Leistung oder des gleichen Nutzens z. B. gemessen in Form von Materialeinsatz in Tonnen pro Fahrzeug. Zentrale Ansätze im Automobilssektor sind:

- Steigerung der Materialeffizienz durch Gewichtsreduktion der Fahrzeuge (Leichtbau) und durch verbessertes Design, hochwertige Materialien und alternative Konstruktionen sowie
- Verbesserung des Produktionsprozesses unter anderem durch Reduktion der Abfallmenge während der Produktion.

Die Optimierung der Energieeffizienz während der Produktion wird nicht näher betrachtet, da hierbei nur die Klimaauswirkungen beeinflusst werden und es keine Auswirkungen auf die Ressourceneffizienz gibt.

Im Automobilssektor haben sich aus der Recherche insgesamt zwei relevante Maßnahmen-Cluster ergeben, welche in Abbildung 10 dargestellt sind. Eine Gewähr auf Vollständigkeit ist nicht gegeben.



Abbildung 10: Maßnahmen-Cluster zum CE-Ansatz Steigerung der Produkt- und Materialeffizienz

Leichtbau ist ein wesentlicher Ansatz zur Steigerung der Produkt- und Materialeffizienz im Automobilssektor. Aus diesem Grund beschäftigen sich die OEMs mit der Forschung zu möglichen Leichtbaumaterialien. Es gibt eine Vielzahl unterschiedlicher Materialien, die für den Leichtbau im Automobilssektor zum Einsatz kommen. Darunter fallen beispielsweise Aluminium(-Hybrid-Karosserien), kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe (CFK), Tailored Blanks⁶⁰ und weitere Verbundwerkstoffe⁶¹. Laut *Material Economics* ist im europäischen Automobilssektor durch Leichtbau ein Einsparpotenzial von neun Millionen Tonnen CO₂ pro Jahr vorhanden.⁶² Das Gewicht der Fahrzeuge ist maßgeblich für den

CO₂-Ausstoß, sodass der Einsatz von **Leichtbaumaterialien im Automobilssektor** (2a) zu einer Reduktion des Fahrzeuggewichts führt. Dies geht mit einem geringeren Treibstoffverbrauch während der Nutzungsphase einher, sodass insgesamt weniger Emissionen ausgestoßen werden. Aufgrund der langen Lebensdauer von Fahrzeugen hat die Nutzungsphase einen wesentlichen Einfluss auf die THG, weswegen die Chance für Klimaneutralität als hoch eingestuft wird. Diese Einsparungen können jedoch durch Rebound-Effekte (seitens der Konsument:innen) wieder aufgehoben werden, sodass hier ein mittleres Risiko besteht. Diese Einschätzung wird durch die energieintensive Herstellung der Verbundmaterialien unterstützt. Seitens der Ressourceneffizienz besteht auch hier ein hohes Chancen-Potenzial durch Verwendung von Leichtbaumaterialien, da sie insgesamt zu einer Gewichtseinsparung führen.⁶³ Aufgrund des Einsatzes von Verbundwerkstoffen, und insbesondere durch kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe und deren unzureichende Recyclingfähigkeit, besteht jedoch auch hier ein mittleres Potenzial für Risiken. Durch CFK besteht das Risiko, andere Kunststoffströme zu verunreinigen.⁶⁴

⁶⁰ Tailored Blanks sind maßgeschneiderte Platinen aus Stahl oder Aluminium. Sie bestehen aus mehreren Blechzuschnitten unterschiedlicher Dicke, Festigkeit und Oberflächenbeschichtung, die durch Laserschweißen zu einem Einzelblech zusammengefügt werden. (Baosteel Tailored Blanks GmbH o. J.)

⁶¹ Beispiel hierfür sind Sandwichstähle, ein Verbundwerkstoff aus Stahl und Kunststoff.

⁶² Material Economics 2018.

⁶³ Ahlers 2016; Daimler AG o. J.

⁶⁴ Material Economics 2018.

Der Einsatz von Tailored Blanks führt zu einem hohen Anteil an Verschnitt und durch die Verbindung verschiedener Stahlsorten wird ein hochwertiges Recycling erschwert. Diese Gründe unterstützten die Einschätzung eines mittleren Risikos der Ressourceneffizienz. Generell ist eine Kreislaufführung jedoch möglich.

Das zweite Cluster beinhaltet Maßnahmen zur **Reduktion der Abfallmenge während der Produktion** (2b). Diese werden durch die Optimierung der Fertigungs- und Nebenprozesse beziehungsweise der Erhöhung von Materialnutzungsgraden umgesetzt. Sie besitzen ein mittleres Potenzial, wobei dieses nicht quantifizierbar belegt werden kann und von vielen Faktoren abhängig ist. So verhindert der optimierte und auf den Leichtbau spezifisch angepasste Einsatz der Materialien die Wiederverwendung von Produktionsabfällen (z. B. „Stanzreste“). Digitale Systeme, wie beispielsweise 3D-Druck, können die Abfallmenge reduzieren, besitzen jedoch einen eigenen Energiebedarf, der das Einsparpotenzial mindert. Insgesamt wurden einige Hindernisse identifiziert. So können beispielweise fehlende einheitliche Vorgaben die Umsetzung des Maßnahmen-Clusters behindern. Aufgrund von Kostenersparnissen werden diese Maßnahmen bereits oft umgesetzt und führen zu einem niedrigen Entwicklungspotenzial. In der folgenden Tabelle werden die Bewertungen der einzelnen Maßnahmen-Cluster zusammengefasst.

2 Maßnahmen-Cluster	Klimaneutralität		Ressourceneffizienz		Hindernisse	Entwicklungs- potenzial	Potenzial für Geschäfts- modelle
	Chancen	Risiken	Chancen	Risiken			
2a Leichtbau- materialien							
2b Reduktion der Abfallmenge während der Produktion							

Tabelle 2: Bewertung der Maßnahmen-Cluster zum CE-Ansatz Steigerung der Produkt- und Materialeffizienz

3.3 Verlängerung der Lebensdauer und effizientere Nutzung der Produkte

Bei dem Ansatz Verlängerung der Lebensdauer und effizientere Nutzung der Produkte wird das Ziel verfolgt, dass die Produkte (hier: Fahrzeuge und/oder deren Komponenten) so lange und intensiv wie möglich genutzt werden. Zentrale Themen bei der Verlängerung der Lebensdauer sind:

- Einsatz qualitativ hochwertiger Materialien, langlebige und demontierbare Konstruktionen,
- Verbesserte Wartung und Instandhaltung,
- Reparaturen und
- Wiederaufbereitung und Wiederverwendung von Fahrzeugkomponenten.

Die effizientere Nutzung von Produkten kann neben den zuvor beschriebenen Maßnahmen auch durch das sogenannte Sharing, also die gemeinsame Nutzung, verbessert werden und führt zu einer Erhöhung der Auslastung. Weitere Themen, die dem dritten CE-Ansatz zugeordnet werden können, sind Product-as-a-Service Angebote.

Maßnahmen zur Verlängerung der Lebensdauer von Fahrzeugen beziehungsweise deren Komponenten sowie der effiziente Nutzung sind vielfältig. Die nachfolgende Abbildung stellt daher nur einen Ausschnitt dar.

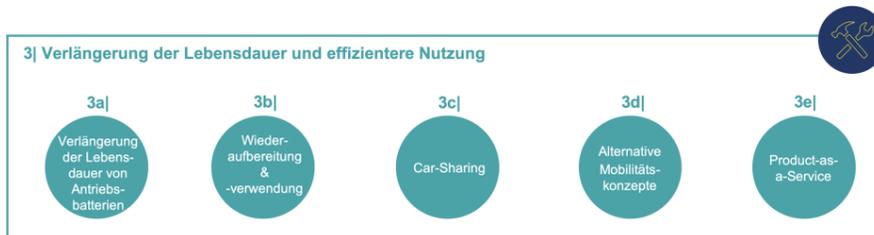


Abbildung 11: Maßnahmen-Cluster zum CE-Ansatz Verlängerung der Lebensdauer & effizientere Nutzung der Produkte

Die **Verlängerung der Lebensdauer von Antriebsbatterien** (3a) kann durch alternative Batterietechnologien, lange Garantiezeiten seitens der Unternehmen und durch einen schonenden Betrieb beispielsweise mit Hilfe eines Batterie Cloud Management Systems umgesetzt werden und besitzen grundsätzlich ein mittleres Potenzial bezüglich der Umweltwirkung. Dieses Potenzial ist jedoch stark abhängig von der technischen Lösung. So kann die Herstellung von alternativen Batterietechnologien mit höheren CO₂-Emissionen und/oder Energiebedarf verbunden sein, sodass der Einfluss auf die Ressourceneffizienz zwar weiterhin sehr hoch ist, der positive Einfluss auf die Klimaneutralität allerdings sinkt. Die Verlängerung und die effizientere Nutzung, beispielsweise durch schonende Lademodi, führt insgesamt zu einem reduzierten Materialbedarf. Die beschränkte Recyclingfähigkeit von Batterien muss trotzdem weiterhin berücksichtigt werden. Hindernisse bestehen insbesondere durch fehlende regulatorische Anforderungen.

Der **Wiederaufbereitung und -verwendung von Fahrzeugkomponenten** (3b) wird ein sehr hohes Potenzial zugeschrieben, da hierdurch sowohl hohe CO₂-Emissionen sowie der Bedarf an Ressourcen reduziert werden kann. Konkret liegt für Europa das Potenzial der THG-Emissionsreduzierungen laut *Material Economics* bei vier Millionen Tonnen CO₂ pro Jahr.⁶⁵ Die Komponenten stehen den Kund:innen bei der Reparatur als

⁶⁵ Material Economics 2018.

kostengünstige Alternative zur Verfügung und es wird dabei die gleiche Gewährleistung wie auf Neuteile gegeben.⁶⁶ Aufgrund der damit verbundenen Kosteneinsparungen sind Risiken durch Rebound-Effekte gegeben. Hindernisse bestehen insbesondere bei der Rückführung beispielsweise durch Unwissenheit der Kund:innen und die unzureichenden Anreize beziehungsweise fehlenden Verpflichtungen für die OEMs, Zulieferer und weiteren involvierten Akteuren.

Bei Angeboten von **Car-Sharing** (3c) liegt der Fokus nicht mehr auf dem Besitzen von Fahrzeugen, sondern auf einer gemeinsamen Nutzung. Durch die zunehmende Bedeutung von Shared Mobility Angeboten⁶⁷ haben sich mittlerweile verschiedene Car-Sharing Varianten⁶⁸ etabliert. In einzelnen Städten werden bereits Car-Sharing Varianten angeboten bei denen die Fahrzeugflotte ausschließlich aus elektroangetriebenen Fahrzeugen besteht. Die Umweltwirkung von **Car-Sharing** hängt von vielen Faktoren ab, bisher wurden jedoch noch keine signifikanten Veränderungen bei der Anzahl der Fahrzeugneuzulassungen nach Etablierung von Sharing-Angeboten festgestellt⁶⁹, sodass insgesamt nur ein mittleres Potenzial geschätzt wurde. In Europa wird erwartet, dass durch Etablierung von Sharing Angeboten insgesamt neun Millionen Tonnen CO₂ pro Jahr eingespart werden könnten.⁷⁰ Da die Gründe der Nutzung von Sharing-Angeboten meist ökonomischer Art oder durch Komfort getrieben sind, bestehen Risiken durch Rebound-Effekte. Dies kann zur Folge haben, dass nur eine geringe Substitution von Pkw stattfindet und Sharing Angebote anstatt des öffentlichen Perso-nennahverkehr genutzt werden.⁷¹ Der Grundgedanke, das Teilen von Fahrzeugen, könnte letztendlich zur Verminderung des Verkehrsaufkommens beziehungsweise des Fahrzeugherstellungsbedarf führen, sodass hier ein Potenzial hinsichtlich der Ressourceneffizienz gegeben ist. Ein derzeitiges Hindernis in Deutschland ist das verfügbare Angebot, dass vor allem in ländlichen Regionen noch nicht vorhanden ist. Gemessen an der Bevölkerungsdichte pro Quadratkilometer und der Vernetzung sogenannter „Hot spot areas“ kommen in Deutschland nur vier Millionen Menschen als potenzielle Nutzer:innen für Car-Sharing Angebote infrage.⁷²

Alternative Mobilitätskonzepte (3d) unterscheiden sich zu Car-Sharing insofern, dass die Auslastung der Fahrzeuge erhöht wird und meistens auch ländliche Regionen in die Planung einbezogen werden, sodass sie dadurch besser an Stadtzentren angebunden werden können. Unterstützt werden diese Konzepte oft durch öffentliche Mobilitätsplattformen, die mit Hilfe eines Algorithmus die Fahrtenfragen zusammenfassen, sodass die Fahrzeuge optimal ausgelastet sind und keine langen Wartezeiten entstehen. Häufig werden bereits Fahrzeugflotten eingesetzt, die aus Fahrzeugen mit alternativen Antrieben, hauptsächlich elektrisch basierte Antriebe, bestehen. Diese Aspekte führen insgesamt zu einem höheren Potenzial als beim Car-Sharing. Die Anzahl der Fahrzeuge verringert sich insgesamt und auch die durch Mobilität verursachten Emissionen pro Person sinken. Risiken bestehen dahingehend, dass es stark auf die Kraftstoffart und die Umsetzung ankommt. Zudem ist das heutige Wirtschaftssystem beziehungsweise die aktuellen politischen Rahmenbedingungen, wie die Förderung des Individualverkehrs durch die Pendlerpauschale, für solche Angebote nicht förderlich und die Gewohnheiten der Konsument:innen verhindern die breite Umsetzung dieser Konzepte. Das Entwicklungspotenzial von alternativen Mobilitätskonzepten wurde als hoch eingeschätzt, da diese Konzepte bisher nur in ausgewählten Städten getestet werden.

⁶⁶ MAN Truck & Bus SE o. J.

⁶⁷ McKinsey 2016a.

⁶⁸ Stationsbasiertes Car-Sharing, Free-Floating, Peer-to-Peer und Mischformen

⁶⁹ Stolle u.a. 2019.

⁷⁰ Material Economics 2018.

⁷¹ Stolle u.a. 2019.

⁷² Stolle u.a. 2019.

Das Maßnahmen-Cluster **Product-as-a-Service** (3e) verschiebt den Fokus vom Produkt zur Dienstleistung (Nutzung statt Besitz) und hat somit einen wesentlichen Einfluss auf die Steigerung der Rückverfolgbarkeit der Produkte und somit die Möglichkeit einer Kreislaufführung. Zudem besitzen die Hersteller:innen eine höhere Verantwortung hinsichtlich der Lebensdauer der Fahrzeuge oder der Komponenten, die durch den Einsatz hochwertiger Materialien gesteigert werden kann. Die Entkopplung von Besitzen und Nutzen kann zu einem weniger verantwortungsvollen Umgang führen, der zu höherem Verschleiß und zu Abnutzungen führt, sodass sich die Lebensdauer solcher Fahrzeuge und/oder Komponenten reduzieren wird. Dieses Risiko kann und wird durch vertragliche Regelungen stark unterbunden. Im Automobilssektor umfasst Product-as-a-Service insbesondere Fahrzeuge und Antriebsbatterien. Auch Möglichkeiten im Bereich der Fahrzeugkomponenten bestehen, sind jedoch noch nicht weit verbreitet. Bei Komponenten besteht noch das Hindernis, dass wirtschaftliche Anreize für die herstellenden Unternehmen fehlen.

Die nachfolgende Tabelle fasst die einzelnen Bewertungen der Maßnahmen-Cluster zusammen.

3 Maßnahmen-Cluster	Klimaneutralität		Ressourceneffizienz		Hindernisse	Entwicklungs- potenzial	Potenzial für Geschäfts- modelle
	Chancen	Risiken	Chancen	Risiken			
3a Verlängerung der Lebensdauer von Antriebsbatterien	●	●	●	●	●	⚙️	💰
3b Wieder- aufbereitung und Wiederverwendung von Fahrzeug- komponenten	●	●	●	●	●	⚙️	💰
3c Car-Sharing	●	●	●	●	●	⚙️	💰
3d Alternative Mobilitätskonzepte	●	●	●	●	●	⚙️	💰
3e Product-as-a- Service	●	●	●	●	●	⚙️	💰

Tabelle 3: Bewertung der Maßnahmen-Cluster zum CE-Ansatz Verlängerung der Lebensdauer und effizientere Nutzung der Produkte

3.4 Substitution von Rohstoffen und Materialien

Der letzte Ansatz befasst sich mit der Substitution von Rohstoffen und Materialien. Ziel dieses Ansatzes ist es, die negativen Auswirkungen von endlichen Rohstoffen, Materialien und Produkten weitestgehend zu vermeiden und nachwachsende Rohstoffe zu nutzen. Zu unterscheiden ist hier der Einsatz alternativer Materialien beziehungsweise die Veränderung der rohstofflichen Basis bestehender Materialien.

Wichtig bei der Substitution von Rohstoffen und Materialien ist es, dass der neue Rohstoff/das neue Material umweltverträglicher ist als das bisher eingesetzte. Um dies zu gewährleisten, müssen die Auswirkungen in jedem Schritt der Wertschöpfungskette betrachtet werden. Hier setzt das Projekt „Life Cycle Technologien für hybride Strukturen“ (LCT) an, dessen Ziel es ist, Multimaterialbauteile lebenszyklusorientiert auszulegen. Dabei soll die Materialwahl entlang der gesamten Wertschöpfungskette hinsichtlich der Kreislauffähigkeit kritisch betrachtet werden. Es werden insbesondere die Nutzung und die End-of-Life Optionen analysiert, da sich bisherige Projekte nur auf die Entwicklung und Herstellung der Bauteile fokussiert haben.⁷³ Durchgeführt wird das Projekt von der *Open Hybrid Lab Factory* (OHLF) und weiteren Akteuren.

Bei der Recherche wurden zahlreiche Beispiele zur Substitution von Rohstoffen und Materialien identifiziert, die sich in drei Cluster einordnen lassen. Diese sind in Abbildung 12 dargestellt. Diese Auflistung bietet keine Gewähr auf Vollständigkeit.



Abbildung 12: Maßnahmen-Cluster zum CE-Ansatz Substitution von Rohstoffen und Materialien

Im Automobilssektor werden **Nachwachsende Rohstoffe** (4a) vor allem für die Innenverkleidungen eingesetzt und umfassen Hanf, Kenaf, Papier, Zellulose, Baumwolle und Holz. Nachwachsende Rohstoffe haben im Allgemeinen eine bessere CO₂-Bilanz als fossile Rohstoffe und sind unendlich verfügbar, sodass ein mittleres Potenzial hinsichtlich der Umweltwirkungen vorhanden ist. Genauere Daten sind jedoch stark abhängig von dem eingesetzten Rohstoff sowie dem Einsatzfeld. Zu berücksichtigen ist zudem die Flächenkonkurrenz, der Verlust an Biodiversität und die Verfügbarkeit insgesamt. Zudem spielt im Bereich der Ressourceneffizienz die Recyclingfähigkeit eine wesentliche Rolle. Im Bereich des Automobilssektors wird der Einsatz von nachwachsenden Rohstoffen durch hohe Sicherheits- und Qualitätsanforderungen beschränkt.

Das Cluster **Nachwachsende Kautschukarten für die Reifenherstellung** (4b) umfasst Forschungsvorhaben und Pilotprojekte, die nach nachwachsenden alternativen Kautschukarten für die Herstellung von Reifen suchen. Ziel ist die Substitution des Kautschukbaums. Mögliche Alternativen sind z. B. die Guayule-Pflanze oder die Löwenzahn-Wurzel. Generell sind die Ergebnisse der Bewertung jedoch stark abhängig von dem

⁷³ Open Hybrid Labfactory o. J.

Ausgangsmaterial, das substituiert wird und dem dafür alternativ eingesetzten Rohstoff. Die vorliegende Bewertung fokussiert sich insbesondere auf die Substitution des Kautschukbaums durch Löwenzahn. Die CO₂- und THG-Emissionen können durch kürzere Transportwege reduziert werden, da Löwenzahn in der Nähe von Industriegebieten gedeiht. Bisher können allerdings nur 15 Prozent der Pflanze für die Herstellung von Kautschuk verwendet werden, sodass große Abfallmengen entstehen, die einer Ressourceneffizienz gegenüberstehen. Zusätzliche Forschung über die mögliche Verwendung dieser Abfallstoffe könnte das Risiko minimieren. Generell gilt, dass alternative Kautschukarten den Einsatz von Erdöl vermeiden oder wenigstens weiter reduzieren können. Im Moment decken synthetische Kautschuke 60 Prozent des weltweiten Bedarfs ab und es ist unklar, ob diese Menge durch alternative Kautschukarten ersetzt werden kann.⁷⁴ Daraus resultiert ein hoher Forschungsbedarf, dem sich bereits einige Unternehmen der Automobilwirtschaft wie beispielsweise *Continental*⁷⁵ oder *Bridgestone* widmen. Zudem hat *Continental* zusammen mit *Michelin* und *SMAG* ein Joint Venture gegründet, das durch Transparenz entlang der Lieferkette die Nachhaltigkeit in der Naturkautschukindustrie steigern soll.⁷⁶

Biobasierte Kunststoffe (4c) spielen im Automobilssektor eine zunehmende Rolle, insbesondere Polyurethane auf Pflanzenöl-Basis, die Polymilchsäure (PLA), die Bio-Polyester (z.B. Bio-PET) und die Naturfaser-Verbundwerkstoffe mit und ohne biobasierte Matrix. Wichtig ist hierbei, dass bei der Forschung nach alternativen Materialien insbesondere im Bereich der Kunststoffe, im Vorfeld die Auswirkungen entlang der gesamten Wertschöpfungskette kritisch analysiert werden müssen. Biobasierte Kunststoffe können unter dieser Berücksichtigung Erdöl und CO₂-Emissionen einsparen. Die Höhe der Ersparnisse ist jedoch abhängig vom eingesetzten Material. Der Aufwand zur Herstellung biobasierter Polymilchsäure (PLA) ist z. B. deutlich höher als der Aufwand für synthetisches Polyethylen (PE). Generell muss auch bei biobasierten Kunststoffen der Verlust an Biodiversität und die Flächenkonkurrenz berücksichtigt werden. Zudem bestehen Risiken hinsichtlich der Ressourceneffizienz darin, dass biobasierte Kunststoffe nicht generell eine bessere Recyclingfähigkeit besitzen und auch die Vielfalt dieser Kunststoffe zu Nachteilen führt. Bei diesem Cluster besteht noch hoher Forschungs- und Regulierungsbedarf.

Die Zusammenfassung der Ergebnisse ist in der nachfolgenden Tabelle enthalten.

4 Maßnahmen-Cluster	Klimaneutralität		Ressourceneffizienz		Hindernisse	Entwicklungs- potenzial	Potenzial für Geschäfts- modelle
	Chancen	Risiken	Chancen	Risiken			
4a Wachsende Rohstoffe im Autobau	●	●	●	●	●	⚙️	💰
4b Wachsende Kautschukarten für die Reifenherstellung	●	●	●	●	●	⚙️	💰
4c Biobasierte Kunststoffe	●	●	●	●	●	⚙️	💰

Tabelle 4: Bewertung der Maßnahmen-Cluster zum CE-Ansatz Substitution von Rohstoffen und Materialien

⁷⁴ Krasnushkina 2017; Chemie.de o. J.

⁷⁵ Continental hat im Jahr 2018 das Forschungslabor „Taraxagum Lab Anklam“ in Mecklenburg-Vorpommern eröffnet, in dem rund 20 Mitarbeiter an Kautschuk-Alternativen forschen. Continental AG 2018.

⁷⁶ Continental AG 2019.

4 HANDLUNGSFELDER FÜR DAS PROJEKT CEWI

Aufgrund der Vielzahl an zuvor definierten und bewerteten Maßnahmen-Clustern erfolgt in diesem Kapitel eine Auswahl an Handlungsfeldern, welche für den weiteren Projektverlauf das größte Potenzial aufweisen. Darüber hinaus werden erste mögliche Fragestellungen für Projektvorhaben formuliert.

Die nachfolgende Abbildung stellt die ausgewählten Handlungsfelder dar, die im weiteren Projektverlauf durch Erarbeitung von Pilotprojektskizzen thematisiert werden sollen. Hier ist darauf hinzuweisen, dass die Cluster **Recycling von kritischen und wertvollen Materialien** (1h) und **Demontage und Aufbereitung von Altfahrzeugen** (1i) zum **Handlungsfeld Altfahrzeugverwertung** zusammengefasst werden.

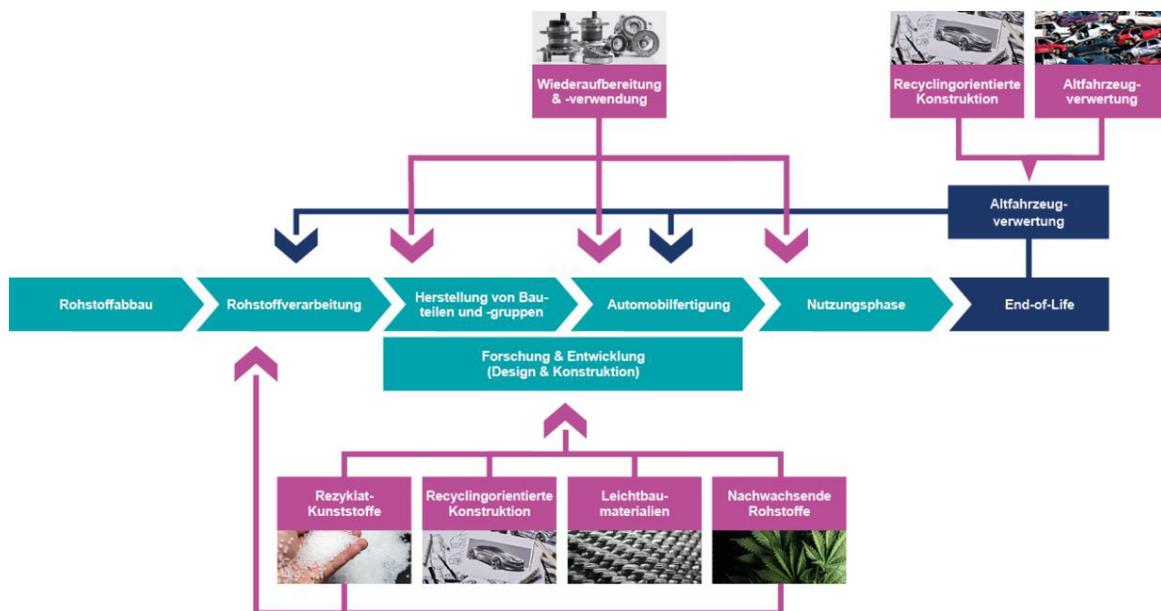


Abbildung 13: Darstellung der ausgewählten Handlungsfelder und deren Einfluss auf die Wertschöpfungskette

Maßnahmen-Cluster, deren Entwicklungsstand in Kapitel 3 bereits als gängige Praxis (rot) eingeschätzt wurden, werden im weiteren Projektverlauf nicht näher betrachtet. Darunter fallen die Cluster **Recycling von Produktionsabfällen** (1a und 1b), der **Einsatz von Aluminium-Rezyklat** (1h), die **Reduktion der Abfallmenge während der Produktion** (2b) und das Cluster **Product-as-a-Service** (3e). Maßnahmen-Cluster deren Entwicklungsstand als mittel (gelb) eingeschätzt wurde, sind bereits zum Teil in der Praxis etabliert. Es gibt jedoch noch Aspekte, die weiterentwickelt werden können – das Entwicklungspotenzial ist demnach noch nicht vollständig ausgeschöpft. Maßnahmen-Cluster mit einem mittleren Entwicklungspotenzial umfassen alle **Recycling-Maßnahmen** (1d, 1e, 1f), mit Ausnahme von **Recycling von kritischen und wertvollen Materialien** (1h), den **Einsatz von Kunststoff-Rezyklat** (1g), **Leichtbaumaterialien** (2a), **Verlängerung der Lebensdauer von Batterien** (3a), **Wiederaufbereitung und -verwendung von Fahrzeugkomponenten** (3b), **Car-Sharing** (3c) und **Biobasierte Kunststoffe** (4c). Bei der Einschätzung eines geringen Entwicklungspotenzials (grün) ist es für den weiteren Projektverlauf von besonderer Bedeutung, Informationen über das konkrete Stadium der Entwicklung zu kennen. Sind noch viele Forschungsfragen ungeklärt, eignet sich das Cluster nicht für das CEWI Projekt. Dies ist bei dem Cluster **Nachwachsende Kautschukarten für die Reifenherstellung** (4b) der Fall.

Im CE-Ansatz Schließung der Stoffkreisläufe werden alle Recycling-Maßnahmen depriorisiert, da es hierzu bereits eine Vielzahl von Aktivitäten gibt und Unternehmen aufgrund möglicher Kosteneinsparungen bereits von sich aus motiviert sind. Zudem sind die positiven Impacts verschiedener Recycling-Maßnahmen abhängig von den jeweiligen Unternehmen, dem Material und der eingesetzten Technologie. Für sektor- und akteursübergreifende Pilotskizzen eignen sie sich daher weniger. Ausgewählte Handlungsfelder im ersten CE-Ansatz sind **Recyclingorientierte Konstruktionen** (1c). Diese Maßnahmen erleichtern jedem Unternehmen die nachfolgenden Prozessschritte inklusive des Recyclings und eignen sich daher gut für das CEWI Projekt. Zudem sind Entwicklungspotenziale vorhanden und auch Geschäftsmodelle lassen sich daraus ableiten. Ebenfalls Entwicklungspotenzial ist für das Maßnahmen-Cluster **Einsatz von Kunststoff-Rezyklat** (1g) vorhanden. Unter anderem aufgrund der Verpflichtung der Altfahrzeugverwertung, das dort vorhandene Potenzial im Bereich Rückführung und Aufbereitung, sowie die zunehmende Wichtigkeit von kritischen und wertvollen Materialien werden diese Aspekte im CEWI Projekt behandelt. Um Unternehmen einen größeren Handlungskorridor zu erlauben, werden die Maßnahmen-Cluster **Demontage und Aufbereitung von Altfahrzeugen** (1h) und **Recycling von kritischen und wertvollen Materialien** (1i), wie oben bereits erwähnt, zu **Altfahrzeugverwertung** (neu: 1h) zusammengefasst.

Bei der Bewertung des Maßnahmen-Clusters **Leichtbaumaterialien** (2a) wurde festgestellt, dass Leichtbau insgesamt im Automobilsektor und bei der Herstellung von Fahrzeugen zukünftig weiterhin eine große Rolle spielen wird, sodass das Cluster zu **Leichtbau im Autobau** (neu: 2a) angepasst wurde. Das bedeutet, dass in der Workshop-Phase nicht nur im Bereich der Materialien Pilotprojekte skizziert werden, sondern auch andere Aspekte, wie z. B. Konstruktionsarten, einbezogen werden können.

Im dritten CE-Ansatz Verlängerung der Lebensdauer und effizientere Nutzung von Produkten wird nur das Maßnahmen-Cluster **Wiederaufbereitung und -verwendung von Fahrzeugkomponenten** (3b) priorisiert. Die Bewertung zeigt für dieses Cluster einen hohen positiven Beitrag sowohl für Klimaneutralität als auch für Ressourceneffizienz an. Viele Unternehmen setzten bereits in einem geringen Umfang dazu Maßnahmen um. Da allerdings noch nicht für alle Komponenten Angebote bestehen, sind hier Entwicklungspotenziale und Möglichkeiten für neue Geschäftsmodelle vorhanden. Wie bereits in Kapitel 3 erwähnt ist bei **Car-Sharing** (3c) bisher kein signifikanter positiver Impact zu erkennen, sodass dieses Thema nicht weiterverfolgt werden soll. **Alternative Mobilitätskonzepte** (3d) haben im Vergleich zum Car-Sharing einen größeren positiven Einfluss, jedoch ist dieses Maßnahmen-Cluster für CEWI ungeeignet. Handlungsmöglichkeiten richten sich hier eher an Kommunen (beziehungsweise Regularien), da es bereits gute Konzepte gibt, deren Umsetzung durch das bestehende System bislang nicht gefördert werden.

Die Maßnahmen-Cluster des vierten Ansatzes zur Substitution von Rohstoffen und Materialien bieten lediglich ein mittleres Potenzial für Weiterentwicklungen. So besteht für alle diese Cluster weiterhin Forschungsbedarf. Das Cluster **Nachwachsende Rohstoffe im Autobau** (4a) weist einerseits Forschungsbedarf auf, andererseits wird es im Autobau bereits eingesetzt. Darüber hinaus wird ein hohes Potenzial für weitere Geschäftsmodelle vermutet. Das Cluster wird deshalb in den weiteren Projektverlauf integriert. Bei dem Cluster **Nachwachsende Kautschukarten für die Reifenherstellung** (4b) handelt es sich um ein komplexes und spezielles Thema, weswegen es im weiteren Projektverlauf nicht betrachtet werden soll. Allgemein können nachwachsende Rohstoffe (auch in Verbindung mit der Reifenherstellung) bei Bedarf in die Workshop-Phase integriert werden. **Biobasierte Kunststoffe** (4c) können bei richtiger Anwendung und unter geeigneten Kriterien einen positiven Beitrag im Bereich Klima und Ressourcen leisten. Auch hierbei handelt es sich um ein sehr komplexes Thema, das dringend weiterer konkreter Forschung bedarf. Im weiteren Projektverlauf wird das Cluster nicht betrachtet.

Nächste Schritte im Projektverlauf

Die vorliegende Kurzstudie stellt die Basis für den weiteren Projektverlauf dar. Nach Veröffentlichung finden Webinare für die beiden Sektoren Automobil und Gebäude statt, in denen die Ergebnisse der Analysen erläutert werden und ein erster Austausch mit interessierten Akteuren aus der Praxis stattfindet soll. Im Juni 2021 ist die Auftaktveranstaltung geplant, in der zum einen das Projekt vorgestellt wird und zum anderen eine Podiumsdiskussion zur Circular Economy und deren Rolle zur Erreichung einer Klimaneutralität und Ressourceneffizienz in beiden Sektoren stattfindet. Darüber hinaus werden die identifizierten Handlungsfelder in Kleingruppen diskutiert. Im Anschluss an die Auftaktveranstaltung startet die Workshop-Phase. Hier werden Unternehmen eingeladen, gemeinsam aktiv an Pilotprojekideen zu arbeiten und diese zu modellieren.



Abbildung 14: Nächste Schritte im Projektverlauf von CEWI

Abschließend werden für die vorgestellten priorisierten Handlungsfelder in der nachfolgenden Abbildung mögliche Fragestellungen aufgeführt. Diese sollen als Ideenanstoß für den weiteren Projektverlauf dienen, insbesondere für das Webinar und die Auftaktveranstaltung.

	Maßnahmen-Cluster	Fragestellungen
 <p>1 Schließung der Stoffkreisläufe</p>	<p>1c Recyclingorientierte Konstruktion</p>	<p>Welche Möglichkeiten zur Erleichterung des Recyclings stecken im Design/Konstruktion von Fahrzeugen? Status Quo und wo gibt es noch Möglichkeiten? Wie können die bestehenden Hindernisse beseitigt werden?</p>
	<p>1g Einsatz von Kunststoff-Rezyklat</p>	<p>Für welche Komponenten ist der Einsatz sinnvoll? Wie kann man die Kreislaufführung von Kunststoffen in der Automobilindustrie steigern? Wie kann der Einsatz von Kunststoff-Rezyklat gesteigert werden? Fokus auf Reinheit legen und Vielfalt an Kunststoffarten einschränken?</p>
	<p>1h Altfahrzeugverwertung</p>	<p>Wie muss ein Konzept aussehen, damit ein Altfahrzeugrecycling zu 100 Prozent realisiert werden kann? Wie ändert sich die Altfahrzeugverwertung durch Anstieg der Elektromobilität (und weiteren alternativen Antrieben)? Liegen Potenziale für Unternehmen eventuell auch in den Hindernissen? Sensibilisierung der Nutzer? Wie können Anreize für Hersteller:innen und Nutzer:innen aussehen, um die Altfahrzeugverwertung zu steigern?</p>
 <p>2 Steigerung der Produkt- und Materialeffizienz</p>	<p>2a Leichtbau im Automobilsektor</p>	<p>Für welche Komponenten dürfen Leichtbaumaterialien in Fahrzeugen eingesetzt werden? Welche Materialien kommen für Leichtbau in Frage? Welche Möglichkeiten bestehen für die Verwendung von Verschnittresten, die insbesondere bei Tailored Blanks entstehen?</p>
 <p>3 Verlängerung der Lebensdauer & effizientere Nutzung der Produkte</p>	<p>3b Wiederaufbereitung und -verwendung von Fahrzeugkomponenten</p>	<p>Tier-One-Lieferant:innen durch Hersteller:innen zur Wiederaufbereitung und Wiederverwendung verpflichten? Joint Ventures? Anreize für Werkstätten seitens der Hersteller:innen? Wie können Nutzer:innen sensibilisiert werden? Welche Möglichkeiten gibt es für die Aufbereitung und die Wiederverwendung elektronischer Komponenten?</p>
 <p>4 Substitution von Rohstoffen und Materialien</p>	<p>4a Nachwachsende Rohstoffe im Autobau</p>	<p>Welche nachwachsenden Rohstoffe können in Zukunft in Fahrzeugen eingesetzt werden – ohne Einbußen in anderen Bereichen bspw. der Sicherheit? Wie nachhaltige sind die eingesetzten Rohstoffe?</p>

Abbildung 15: Mögliche Fragestellungen zu den ausgewählten Handlungsfeldern

5 LITERATURVERZEICHNIS

- Ahlers, Michael (2016): „Carbon Core – die neue BMW 7er Karosserie.“ In: Karosseriebautage Hamburg 2016. Wiesbaden: Springer Fachmedien (= Proceedings), S. 125–135. Online im Internet: DOI: 10.1007/978-3-658-14144-8_9
- AIMPLAS (2020): New Method of Recycling Plastics from End-of-Life Vehicles Reduces Carbon Footprint by 75%. Online im Internet: URL: <https://www.aimplas.net/blog/new-method-recycling-plastics-end-of-life-vehicles-reduces-carbon-footprint-75/> (Zugriff am: 24.03.2021).
- Baosteel Tailored Blanks GmbH (o. J.): Tailored Blanks. Tailored Blanks. Online im Internet: URL: <https://www.tailored-blanks.com/de/tailored-blanks> (Zugriff am: 27.04.2021).
- Bär, Holger; Runkel, Matthias; Schlichter, Leo (2020): Greenpeace. Reformvorschlag Kfz-Steuer: Wie eine Zulassungssteuer Klimaschutz im Verkehr voranbringen kann. Online im Internet: URL: https://www.greenpeace.de/sites/www.greenpeace.de/files/publications/20200603_foes_zulassungssteuer_klimaschutz.pdf
- BMW AG (2009): Fahrzeugrecycling. Online im Internet: URL: https://www.bmw.de/content/dam/bmw/marketDE/bmw_de/topics/offers-and-services/pdf/recycling-flyer.pdf.asset.1511746057841.pdf
- Bringezu, S. u.a. (2017): Assessing global resource use: A systems approach to resource efficiency and pollution reduction (A Report of the International Resource Panel).
- Buchberger, Silvia u.a. (2019): „Das Konzept der Circular Economy als Maxime für Beschaffung und Vertrieb in der Industrie.“ In: Arbeitsberichte - Working Papers, (2019), 46.
- Bundesfinanzministerium (o. J.): Bundesministerium der Finanzen. Kfz-Steuer-Rechner - Bundesfinanzministerium - Service. Online im Internet: URL: https://www.bundesfinanzministerium.de/Web/DE/Service/Apps_Rechner/KfzRechner/KfzRechner.html (Zugriff am: 04.05.2021).
- Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (o. J.): Automobilindustrie. Online im Internet: URL: <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Textsammlungen/Branchenfokus/Industrie/branchenfokus-automobilindustrie.html> (Zugriff am: 09.02.2021).
- Bundesverband Sekundärrohstoffe und Entsorgung (o. J.): <https://www.bvse.de>. Wirklich unzertrennlich? Seltene Erden trennen und recyceln. Online im Internet: URL: <https://www.bvse.de/schrott-elektronikgeraete-recycling/nachrichten-schrott-eschrott-kfz/3460-wirklich-unzertrennlich-seltene-erden-trennen-und-recyceln.html> (Zugriff am: 23.03.2021).
- Buruzs, A.; Torma, A. (2018): „A Review on the Outlook of the Circular Economy in the Automotive Industry.“ In: International Journal of Environmental and Ecological Engineering, 11 (2018), 6, S. 576–580. Online im Internet: URL: <https://publications.waset.org/10008699/a-review-on-the-outlook-of-the-circular-economy-in-the-automotive-industry> (Zugriff am: 27.04.2021).
- Chemie.de (o. J.): Kautschuk. Online im Internet: URL: <https://www.chemie.de/lexikon/Kautschuk.html> (Zugriff am: 24.03.2021).
- Chmielewski, F. (o. J.): WLTP - Näher an der Realität. Online im Internet: URL: <https://www.leasingrate24.de/component/k2/item/8-wltp-naeher-an-der-realitaet> (Zugriff am: 04.05.2021).

- Continental AG (2018): Continental eröffnet Forschungs- und Versuchslabor für Löwenzahnkautschuk „Taraxagum Lab Anklam.“ Online im Internet: URL: <https://www.continental-reifen.de/autoreifen/ueber-continental/media-services/archiv/archiv-2018/20181206-continental-eroeffnet-taraxagum-lab-anklam> (Zugriff am: 14.04.2021).
- Continental AG (2019): Michelin, Continental und SMAG gründen Joint Venture für mehr Nachhaltigkeit in der Naturkautschukindustrie. Online im Internet: URL: <https://www.continental.com/de/presse/pressemitteilungen/2019-09-12-rubberway-187070> (Zugriff am: 27.04.2021).
- Daimler AG (o. J.): marsMediaSite. Karosserie: Intelligenter Leichtbau. Online im Internet: URL: <https://media.daimler.com/marsMediaSite/de/instance/ko/Karosserie-Intelligenter-Leichtbau.xhtml?oid=9905241> (Zugriff am: 24.03.2021).
- Ellen MacArthur Foundation (2015a): Growth Within: A Circular Economy Vision for a Competitive Europe. Online im Internet: URL: https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/publications/EllenMacArthurFoundation_Growth-Within_July15.pdf
- Ellen MacArthur Foundation (2016): The New Plastics Economy - Rethinking the future of plastics. Online im Internet: URL: https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/EllenMacArthurFoundation_TheNewPlasticsEconomy_Pages.pdf
- Ellen MacArthur Foundation (2015b): Towards a Circular Economy: Business Rationale for an Accelerated Transition. Online im Internet: URL: https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/publications/TCE_Ellen-MacArthur-Foundation_26-Nov-2015.pdf
- Elsner, Harald u.a. (2019): Deutschland – Rohstoffsituation 2018. Online im Internet: URL: https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Min_rohstoffe/Downloads/rohsit-2018.pdf?__blob=publicationFile&v=5
- Europäische Kommission (2019): Der europäische Grüne Deal. Brüssel: Online im Internet: URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?qid=1596443911913&uri=CELEX:52019DC0640#document2> (Zugriff am: 26.01.2021).
- Europäische Kommission (2020): Ein neuer Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft. Für ein saubereres und wettbewerbsfähigeres Europa. Online im Internet: URL: https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:9903b325-6388-11ea-b735-01aa75ed71a1.0016.02/DOC_1&format=PDF
- Europäische Union (2019): „Verordnung (EU) 2019/ des Europäischen Parlaments und des Rates vom 20. Juni 2019 zur Festlegung von CO2-Emissionsnormen für neue schwere Nutzfahrzeuge und zur Änderung der Verordnungen (EG) Nr. 595/2009 und (EU) 2018/956 des Europäischen Parlaments und des Rates sowie der Richtlinie 96/53/EG des Rates.“ In: (2019), S. 39.
- Eurostat (2020): End-of-life vehicle statistics - Statistics Explained. Online im Internet: URL: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/End-of-life_vehicle_statistics#Number_of_end-of-life_vehicles (Zugriff am: 27.04.2021).
- Greiff, Kathrin; Faulstich, Martin (2018): Resource Efficiency: Trends and the Potential of Circular Economy.
- hesselmann service GmbH (2020): batteriegesetz.de. Das neue Batteriegesetz (BattG2) 2020 - Das neue Batteriegesetz (BattG) 2021. Online im Internet: URL: <https://www.batteriegesetz.de/themen/das-neue-batteriegesetz-battg2-2020/> (Zugriff am: 04.05.2021).

- Hütter, Andrea (2013): Verkehr auf einen Blick. Online im Internet: URL: <https://docplayer.org/37599-Verkehr-auf-einen-blick-statistisches-bundesamt.html> (Zugriff am: 27.04.2021).
- infas, DRL und IVT (2019): Mobilität in Deutschland. Online im Internet: URL: http://www.mobilitaet-in-deutschland.de/pdf/MiD2017_Ergebnisbericht.pdf
- Knaufindustries Automotive (2020): Knauf Industries Automotive. Recycelte Kunststoffe in der Automobilindustrie - Knauf Automotive. Online im Internet: URL: <https://knaufautomotive.com/de/recycelte-kunststoffe-in-der-automobilindustrie/> (Zugriff am: 24.03.2021).
- Krasnushkina, Nadya (2017): Alternative zu Kautschuk: Löwenzahn gibt Gummi. Online im Internet: URL: <https://www.handelsblatt.com/technik/energie-umwelt/circular-economy/alternative-zu-kautschuk-loewenzahn-gibt-gummi/20472456.html> (Zugriff am: 24.03.2021).
- MAN Truck & Bus SE (o. J.): MAN Original Teile. Online im Internet: URL: <https://www.services.man.eu/de/de/man-original-teile-357064.html> (Zugriff am: 13.04.2021).
- Material Economics (2018): The Circular Economy: A Powerful Force for Climate Mitigation. Online im Internet: URL: <https://materialeconomics.com/publications/the-circular-economy-a-powerful-force-for-climate-mitigation-1>
- McKinsey (2016a): Automotive revolution – perspective towards 2030: How the convergence of disruptive technology-driven trends could transform the auto industry. Online im Internet: URL: <https://www.mckinsey.com/~media/mckinsey/industries/automotive%20and%20assembly/our%20insights/disruptive%20trends%20that%20will%20transform%20the%20auto%20industry/auto%202030%20report%20jan%202016.pdf> (Zugriff am: 11.02.2021).
- McKinsey (2016b): The circular economy: Moving from theory to practice | Sustainability | McKinsey & Company. Online im Internet: URL: <https://www.mckinsey.com/business-functions/sustainability/our-insights/the-circular-economy-moving-from-theory-to-practice> (Zugriff am: 23.03.2021).
- Müller, Axel; Kerkow, Uwe (2014): „Vom Erz zum Auto: Mitverantwortung der deutschen Automobilindustrie.“ In: (2014), S. 13–21.
- O. V. (o. J.): Verkehr. Online im Internet: URL: <http://www.wirtschaftslexikon24.com/d/verkehr/verkehr.htm> (Zugriff am: 25.02.2021).
- OECD (2019a): Business Models for the Circular Economy: Opportunities and Challenges for Policy. Online im Internet: URL: https://www.oecd-ilibrary.org/environment/business-models-for-the-circular-economy_g2g9dd62-en (Zugriff am: 02.02.2021).
- OECD (2019b): Business Models for the Circular Economy: Opportunities and Challenges for Policy. Online im Internet: URL: https://www.oecd-ilibrary.org/environment/business-models-for-the-circular-economy_g2g9dd62-en;jsessionid=Y1fGqrtGPv-F7_u9thZR8LA3.ip-10-240-5-100 (Zugriff am: 27.04.2021).
- Open Hybrid Labfactory (o. J.): Life Cycle Technologien für hybride Strukturen – LCT. Online im Internet: URL: https://open-hybrid-labfactory.de/fileadmin/3_Projekte/projektsteckbrief-lct-deu-OHLF.pdf
- Schmidt-Bleek, Friedrich u.a. (1998): „MAIA: Einführung in die Material-Intensitäts-Analyse nach dem MIPS-Konzept.“ In: (1998). Online im Internet: URL: <https://epub.wupperinst.org/frontdoor/index/index/docId/663> (Zugriff am: 23.03.2021).
- Schüler, Doris (2011): Öko-Institut e.V. Seltene Erden - Daten & Fakten. Online im Internet: URL: <https://www.oeko.de/fileadmin/pdfs/oekodoc/1110/2011-001-de.pdf>

- Schulz, Eva (2020): Sonderabfallwissen. Recycling und Entsorgung von E-Auto-Batterien. Online im Internet: URL: <https://www.sonderabfall-wissen.de/wissen/recycling-und-entsorgung-von-e-auto-batterien/> (Zugriff am: 05.02.2021).
- Statista (2021): Statista. Beschäftigte in der Automobilindustrie 2019. Online im Internet: URL: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/30703/umfrage/beschaefigtetenzahl-in-der-automobilindustrie/> (Zugriff am: 27.04.2021).
- Statista (2020): Statista. Bruttowertschöpfung der deutschen Automobilindustrie. Online im Internet: URL: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/290075/umfrage/bruttowertschoepfung-der-deutschen-automobilindustrie/> (Zugriff am: 27.04.2021).
- Steffen, Will u.a. (2015): „Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet.“ In: Science, 347 (2015), 6223. Online im Internet: DOI: 10.1126/science.1259855 (Zugriff am: 23.03.2021).
- Stephan, Benjamin; Lee, Insung; Kim, Jiseok (2019): „Crashing the Climate: How Car Industry is Driving the Climate Crisis.“ In: (2019), S. 44.
- Stolle, Wulf u.a. (2019): The Demystification of Car Sharing - An in depth analysis of customer perspective underlying economics and secondary effects. AT Kearney. Seite 6. Online im Internet: URL: <https://www.de.kearney.com/documents/1117166/0/Car+Sharing.pdf/3bff4a9a-1279-b26f-3b23-8183f14979ce?t=1567671915045>
- Stuchtey, Dr Martin R (2016): „Circular Economy: Werte schöpfen, Kreisläufe schließen.“ In: (2016), S. 16.
- Tambovceva, Tatjana; Titko, Jelena (o. J.): Introduction to Circular Economy. Ekonomikas un kulturas augstskola.
- Tappeser, Valentin; Chichowitz, Lisa (2017): Umgang mit Altfahrzeugen. evolution2green.
- Umweltbundesamt (2020a): Umweltbundesamt. Altauto, Altautoverwertung. Umweltbundesamt. Online im Internet: URL: <https://www.umweltbundesamt.de/umwelttipps-fuer-den-alltag/mobilitaet/altauto-altautoverwertung> (Zugriff am: 04.02.2021).
- Umweltbundesamt (2020b): Umweltbundesamt. Altfahrzeugverwertung und Fahrzeugverbleib. Umweltbundesamt. Online im Internet: URL: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/ressourcen-abfall/verwertung-entsorgung-ausgewaehler-abfallarten/altfahrzeugverwertung-fahrzeugverbleib> (Zugriff am: 24.03.2021).
- Umweltbundesamt (2020c): Umweltbundesamt. Emissionen des Verkehrs. Umweltbundesamt. Online im Internet: URL: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/verkehr/emissionen-des-verkehrs> (Zugriff am: 27.04.2021).
- VerkehrsRundschau (2020): VerkehrsRundschau.de. Klimaschutzbericht: CO2-Emissionen im Verkehr gestiegen. Online im Internet: URL: <https://www.verkehrsrundschau.de/nachrichten/klimaschutzbericht-co2-emissionen-im-verkehr-gestiegen-2654114.html> (Zugriff am: 25.02.2021).
- Volkswagen AG (2019): Nachhaltigkeitsbericht 2018. Online im Internet: URL: https://www.volkswagenag.com/presence/investorrelation/publications/shareholder-meetings/2019/nachhaltigkeitsbericht/VW_Nachhaltigkeitsbericht_2018.pdf
- Volkswagen AG (o. J.): Recycling & Altfahrzeugentsorgung. Online im Internet: URL: <https://www.volkswagen.de/de/besitzer-und-nutzer/wichtige-kundeninformationen/rechtliches/recycling-und-altfahrzeugentsorgung.html> (Zugriff am: 24.03.2021).
- Wagner, Christopher (2020): WELTEXPORTE. Made in Germany – die meist exportierten Güter Deutschlands. Online im Internet: URL: <https://www.wellexport.de/exportprodukte-deutschland/> (Zugriff am: 23.03.2021).

- Wijkman, Anders; Skånberg, Kristian; Berglund, Märten (2015): The Circular Economy and Benefits for Society: Jobs and Climate Clear Winners in an Economy Based on Renewable Energy and Resource Efficiency. Online im Internet: URL: <https://www.lagazettedescommunes.com/telechargements/etude-club-rome-eng.pdf>
- Wilts, Henning (2018): „Was passiert mit unserem Müll? Nationaler Müllkreislauf und internationale Müllökonomie.“ In: APuZ, 49–50 (2018), S. 09–16. Online im Internet: URL: https://epub.wupperinst.org/frontdoor/deliver/index/docId/7191/file/7191_Wilts.pdf
- Wittich, Holger; Harloff, Thomas (2020): auto motor und sport. Bundesrat billigt Kfz-Steuer-Reform: Die dicke Kfz-Steuer für dicke Autos kommt 2021. Online im Internet: URL: <https://www.auto-motor-und-sport.de/verkehr/kfz-steuer-reform-mehr-co2-ausstoss-kostet/> (Zugriff am: 04.05.2021).
- ZWE (2020): „IKT-Branche 2018 - Volkswirtschaftliche Kennzahlen, Innovations- und Gründungsgeschehen.“ In: Leibniz Zentrum für Europäische Wirtschaftsforschung, (2020), S. 20. Online im Internet: URL: https://www.de.digital/DIGITAL/Redaktion/DE/Publikation/ikt-branche-2018.pdf?__blob=publicationFile&v=3
- (2009): „Grundlagen der Automobilindustrie“ (2009): In: Strategien in der Automobilindustrie. Vieweg+Teubner, (2009). Online im Internet: DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-8348-9311-6_1