



Aktuelle Entwicklungen der Circular Economy im Nutzfahrzeugsektor

Current developments of the circular economy in the commercial vehicle sector

Semesterarbeit
an der School of Engineering and Design der
Technischen Universität München

Themenstellender Prof. Dr.-Ing. Johannes Fottner
Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik

Betreuer/Betreuerin Pia Vollmuth, M.Sc.
Carolin Escherich, M.Sc.

Eingereicht von: Henriette Vogel
[REDACTED]
[REDACTED]
[REDACTED]

Eingereicht am: 30.05.2023 in Garching

Inventarnr. fml: 2022/089

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand unter der wissenschaftlichen und inhaltlichen Anleitung von **Pia Vollmuth und Carolin Escherich**, wissenschaftliche Mitarbeiterinnen am Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik (fml) der Technischen Universität München.

Vereinbarung zum Urheberrecht

Hiermit gestatte ich dem Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik diese Studienarbeit bzw. Teile davon nach eigenem Ermessen an Dritte weiterzugeben, zu veröffentlichen oder anderweitig zu nutzen. Mein persönliches Urheberrecht ist über diese Regelung hinaus nicht beeinträchtigt.

Eventuelle Geheimhaltungsvereinbarungen über den Inhalt der Arbeit zwischen mir bzw. dem Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik und Dritten bleiben von dieser Vereinbarung unberührt.

A black, rounded rectangular redaction box covers the signature of the author.

München, 30.05.2023

Hinweis: In dieser Semesterarbeit wird das generische Maskulinum zur besseren Lesbarkeit verwendet. Die Personenbezeichnungen beziehen sich auf alle Geschlechter.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	III
1 Einleitung	1
1.1 Ausgangslage und Problemstellung	1
1.2 Zielsetzung und Vorgehen	2
2 Stand der Wissenschaft und Technik	3
2.1 Nutzfahrzeugsektor	3
2.1.1 Einteilung von Nutzfahrzeugen	3
2.1.2 Aufbau von Nutzfahrzeugen	5
2.1.3 Einsatz von Nutzfahrzeugen	7
2.1.4 Marktteilnehmer	7
2.1.5 Aktuelle Trends und Entwicklungen	8
2.2 Kreislaufwirtschaft in der Theorie	10
2.2.1 Begriffsbestimmung und Einordnung	10
2.2.2 Circular Economy Frameworks	12
2.2.3 Metriken und Reifegradmodelle	14
2.2.4 Politische und rechtliche Vorgaben	14
2.2.5 Chancen und Erfolgsfaktoren	17
2.2.6 Herausforderungen	18
2.3 Kreislaufwirtschaft in der Praxis	19
2.3.1 Rohstoffgewinnung	20
2.3.2 Produktdesign	21
2.3.3 Produktion	22
2.3.4 Vertrieb	22
2.3.5 Nutzung	23
2.3.6 Reparatur und Wiederverwendung	24
2.3.7 Sammlung	24
2.3.8 Recycling	27
2.3.9 Entsorgung	27
3 Methodik	29
3.1 Literaturrecherche	29
3.2 Experteninterviews	30
3.2.1 Experten	30
3.2.2 Interviewleitfaden	31
3.2.3 Auswertung der Interviews	31
4 Ist-Analyse der Kreislaufwirtschaft im Nutzfahrzeugsektor	33

4.1	Ist-Situation	33
4.1.1	Rohstoffe, Produktdesign und Produktion	35
4.1.2	Vertrieb und Nutzungsphase	37
4.1.3	Reparatur, Wiederverwendung und Remanufacturing	39
4.1.4	Recycling und Entsorgung	40
4.2	Hemmnisse	40
4.2.1	Marktebene	41
4.2.2	Unternehmensebene	42
4.2.3	Produktebene	44
4.3	Treiber	45
4.3.1	Intrinsische Treiber	45
4.3.2	Extrinsische Treiber	46
4.4	Potenziale	48
4.4.1	Kurzfristige Ergebnisse	49
4.4.2	Mittelfristige Verbesserungen	51
4.4.3	Langfristige Veränderungen	52
5	Diskussion und Fazit	53
5.1	Limitierungen	53
5.2	Ausblick	53
5.3	Fazit	54
	Literaturverzeichnis	57
	Abbildungsverzeichnis	67
A	Anhang A	A-1
B	Anhang B	B-1

Abkürzungsverzeichnis

BE	Battery Electric
BEV	Battery Electric Vehicle
CE	Circular Economy
CO₂	Kohlenstoffdioxid
ELV	EU-Richtlinie 2000/53/EG über Altfahrzeuge (End of Life Vehicle Directive)
EoL	End-of-Life
EPR	Erweiterte Herstellerverantwortung (Extended Producer Responsibility)
EU	Europäische Union
FCE	Fuel Cell Electric
KFZ	Kraftfahrzeug
KI	Künstliche Intelligenz
LKW	Lastkraftwagen
NFZ	Nutzfahrzeug
OEM	Original Equipment Manufacturer
PaaS	Product-as-a-Service
PCR	Post-consumer-Rezyklat
PIR	Post-industrial-Rezyklat
PKW	Personenkraftwagen
REACH	Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals
TaaS	Truck-as-a-Service
TCO	Total Cost of Ownership
THG	Treibhausgasemissionen
VW	Volkswagen
WEEE	Waste Electrical & Electronic Equipment

1 Einleitung

In diesem Kapitel wird in das Thema Circular Economy (CE) eingeführt und der Handlungsbedarf verdeutlicht. Weiterhin wird das Ziel und der Aufbau dieser Semesterarbeit zu aktuellen Entwicklungen der CE im Nutzfahrzeug (NFZ)-Sektor dargestellt.

1.1 Ausgangslage und Problemstellung

Jedes Jahr verbraucht die Menschheit fast die doppelte Menge der zur Verfügung stehenden Ressourcen, die die Erde innerhalb eines Jahres generieren kann [Umw-2022c]. Für Deutschland liegt der Earth Overshoot Day, der Tag an dem die Ressourcen verbraucht sind, die rechnerisch für einen Zeitraum von einem Jahr zur Verfügung ständen, bereits im Mai. Dadurch werden in einem Jahr Ressourcen von fast drei Erden verbraucht [BCG-2020, S. 5]. Daneben resultieren schätzungsweise 50 % der Treibhausgasemissionen (THG) und 90 % des Biodiversitätsverlusts aus Rohstoffgewinnung und -verarbeitung [Eur-2019a, S. 8]. Auch für die Zukunft wird prognostiziert, dass der Verbrauch von Ressourcen und die Müllproduktion weiter steigen werden [Eur-2020d, S. 4].

Diese alarmierenden Zahlen resultieren aus dem historisch gewachsenen „take, make, waste“ Prinzip [Sti-2021, S. 53]. Konsum und Produktion müssen folglich nachhaltiger werden, wie im Sustainable Development Goal 12 festgehalten ist [UN-2022, S. 50]. Dafür müssen in Zukunft Wirtschaftswachstum und Wohlstandsentwicklung vom Ressourcenverbrauch entkoppelt sein [Bra-2021, S. 6].

Erreicht werden kann dies durch den Übergang von der Wegwerfgesellschaft zur CE. Als regeneratives Wirtschaftssystem hat die CE das Ziel, einen möglichst hohen Wert der Produkte und Materialien zu erhalten [Eil-2015, S. 46]. Dafür muss sowohl bei der Nutzung von Rohstoffen („take“), bei der Herstellung und dem Einsatz von Produkten („make“) sowie am Lebensende („waste“) ein Umdenken stattfinden [Eil-2015, S. 48]. Aktuell funktioniert nur 10,4 % der deutschen Wirtschaft zirkulär [BCG-2020, S. 4]. Um den Ressourcenverbrauch so zu reduzieren, dass dieser innerhalb eines Jahres durch die Erde regeneriert werden kann, wären 50-70 % Zirkularität nötig [BCG-2020, S. 9]. Der weltweite Durchschnitt liegt nur bei 8,6 % [Cir-2022, S. 24]. Die CE ist folglich ein essenzieller Schritt, um nachhaltiger zu wirtschaften, Klimaneutralität in der Industrie zu erreichen und damit auch langfristige Wettbewerbsfähigkeit sicherzustellen [Eur-2020a, S. 7]. Diese Transition betrifft alle Industrien, weshalb Unternehmen Verantwortung übernehmen und sich mit den Möglichkeiten der CE bezogen auf die eigenen Geschäftsmodelle, Produkte, Services und Prozesse auseinandersetzen müssen [Sti-2021, S. 1]. Dies betrifft auch den NFZ-Sektor, der in dieser Arbeit näher betrachtet wird und anhand dessen aktuelle Entwicklungen der CE untersucht werden.

1.2 Zielsetzung und Vorgehen

Bei Betrachtung des gesamten Lebensweges von NFZ können verschiedene Strategien zur Erreichung der CE verfolgt werden. Ziel dieser Arbeit ist, die aktuelle Ist-Situation zu analysieren und Potenziale und Hemmnisse für die Erreichung der CE im NFZ-Sektor zu identifizieren. Dafür werden allgemeine CE-Strategien und Beispiele für CE aus anderen Sektoren betrachtet. Weiterhin werden aktuelle Entwicklungen im NFZ-Sektor recherchiert und durch Experteninterviews um einen aktuellen Einblick in die Industrie ergänzt.

Die Arbeit ist in fünf Kapitel gegliedert, wie in Abbildung 1-1 dargestellt. Einleitend wird in Kapitel 1 die Ausgangslage, Motivation und Zielsetzung für diese Arbeit dargelegt und das Vorgehen beschrieben. Darauffolgend wird in Kapitel 2 Grundwissen zum NFZ-Sektor und dem Thema CE aufgebaut und ein allgemeiner Überblick über potenzielle CE-Maßnahmen geschaffen. Dafür werden theoretische Frameworks und Strategien sowie praktische Beispiele aus Sektoren wie der Automobilindustrie und dem Maschinen- und Anlagenbau betrachtet. In Kapitel 3 wird das methodische Vorgehen der Literaturrecherche und der Experteninterviews vorgestellt. Das erarbeitete Wissen über NFZ und die CE wird in Kapitel 4 verknüpft, die Ist-Situation der CE im NFZ-Sektor analysiert und Hemmnisse, Treiber und Potenziale identifiziert. Die Ergebnisse werden in Kapitel 5 diskutiert, zusammengefasst und weiterer Forschungsbedarf aufgezeigt.

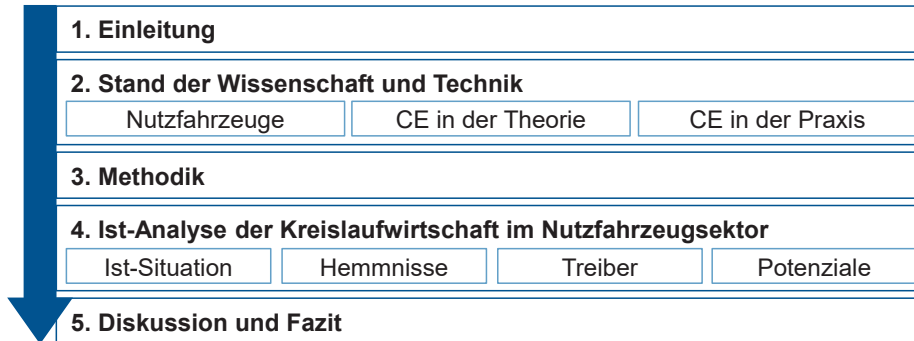


Abbildung 1-1: Aufbau der Semesterarbeit (eigene Darstellung)

2 Stand der Wissenschaft und Technik

Um die aktuellen Entwicklungen der CE im NFZ-Sektor zu betrachten, wird zunächst ein Verständnis über den NFZ-Sektor geschaffen. Die verschiedenen NFZ werden voneinander abgegrenzt, ihr Aufbau und Einsatz unterschieden und die verschiedenen Marktteilnehmer dargestellt. Aktuelle Trends werden betrachtet und der Fokus auf den Nachhaltigkeitstrend gelegt. Der zweite Teil dieses Kapitels beschäftigt sich mit der CE, fasst die theoretischen Grundlagen, CE-Modelle und politischen Vorgaben zusammen und nennt Chancen und Herausforderungen. Im dritten Teil werden die verschiedenen CE-Ansätze entlang der Wertschöpfungskette detailliert und um praktische Beispiele z.B. aus der Automobilindustrie und dem Maschinen- und Anlagenbau ergänzt. Der regionale Fokus der Recherche liegt auf Deutschland und Europa. Aufgrund der Aktualität, Komplexität und des Umfangs des Themas CE wird nur ein Überblick geschaffen, aber keine vollständige Analyse durchgeführt.

2.1 Nutzfahrzeugsektor

Als NFZ werden Kraftfahrzeuge (KFZ) bezeichnet, die Personen befördern, Güter transportieren oder Anhängenfahrzeuge ziehen [Kra-2022a, S. 76]. Personenkraftwagen (PKW) und Krafträder sind nicht mit eingeschlossen. Die NFZ können nach ihren Transportaufgaben und Funktionen unterschieden werden, die sehr vielseitig sind. Genauso wie Lastkraftwagen (LKW) und Omnibusse zählen auch Müllsammelfahrzeuge oder Traktoren zu den NFZ [Ren-2021, S. 1]. Für den Betreiber ist das Fahrzeug ein Investitionsgut, worin ein klarer Unterschied zu PKW besteht, die Gebrauchsgüter für die individuelle Mobilität des Kunden mit hoher emotionaler Verbindung sind [Ren-2021, S. 1]. Ausfälle des NFZ haben starke Folgeschäden für den Betreiber, weshalb an die Fahrzeuge besonders hohe Forderungen an die Zuverlässigkeit gestellt werden [Ren-2021, S. 3].

Der Güterverkehr steht in einem engen Zusammenhang mit der konjunkturellen Entwicklung, da eine erhöhte wirtschaftliche Aktivität auch eine höhere Transportleistung benötigt [Sta-2023]. Die Relevanz von NFZ für die Transportleistung zeigt sich am Anteil des Güterverkehrs auf der Straße von 77,3 % in der Europäischen Union (EU) in 2021 [Eur-2023c]. Bei steigender Flexibilisierung der Produktion eignet sich der Straßentransport aufgrund der höheren Flexibilität besser als der Schienentransport [Ren-2021, S. 66].

2.1.1 Einteilung von Nutzfahrzeugen

NFZ werden in verschiedene Klassen entsprechend ihres Gewichts sowie ihrer Transportaufgabe eingeteilt, wie in 2-1 dargestellt [She-2016, S. 20]. Während PKW zur Klasse M1

gehören, werden NFZ in M2, M3, N1 und N2 eingeteilt. Mit M sind KFZ zur Personenbeförderung bezeichnet, mit N KFZ zum Gütertransport. Unter M2 fallen verschiedene Typen von Bussen bis 5 t, M3 sind Busse über 5 t. Busse haben als Abgrenzung zum PKW mehr als 8 Sitzplätze außer dem Fahrersitz. Zur Klasse N1 gehören leichte NFZ zur Güterbeförderung mit unter 3,5 t, zur Klasse N2 mittlere NFZ mit bis zu 12 t und zur Klasse N3 schwere NFZ mit über 12 t. LKW lassen sich nach dem Aufbau typ z.B. in Fahrzeuge mit Plattform, offenem Kasten mit Plane, geschlossenem Kasten oder einem Spezialaufbau wie Tankkraftwagen einteilen. Die Klasse 0 umfasst Anhänger wie z.B. Sattelanhänger. Die Kombination aus einem LKW und einem Anhänger wird als Lastzug bezeichnet. Weiterhin gehören land- und forstwirtschaftliche Fahrzeuge zu den NFZ. [Kra-2021b, S. 15ff]

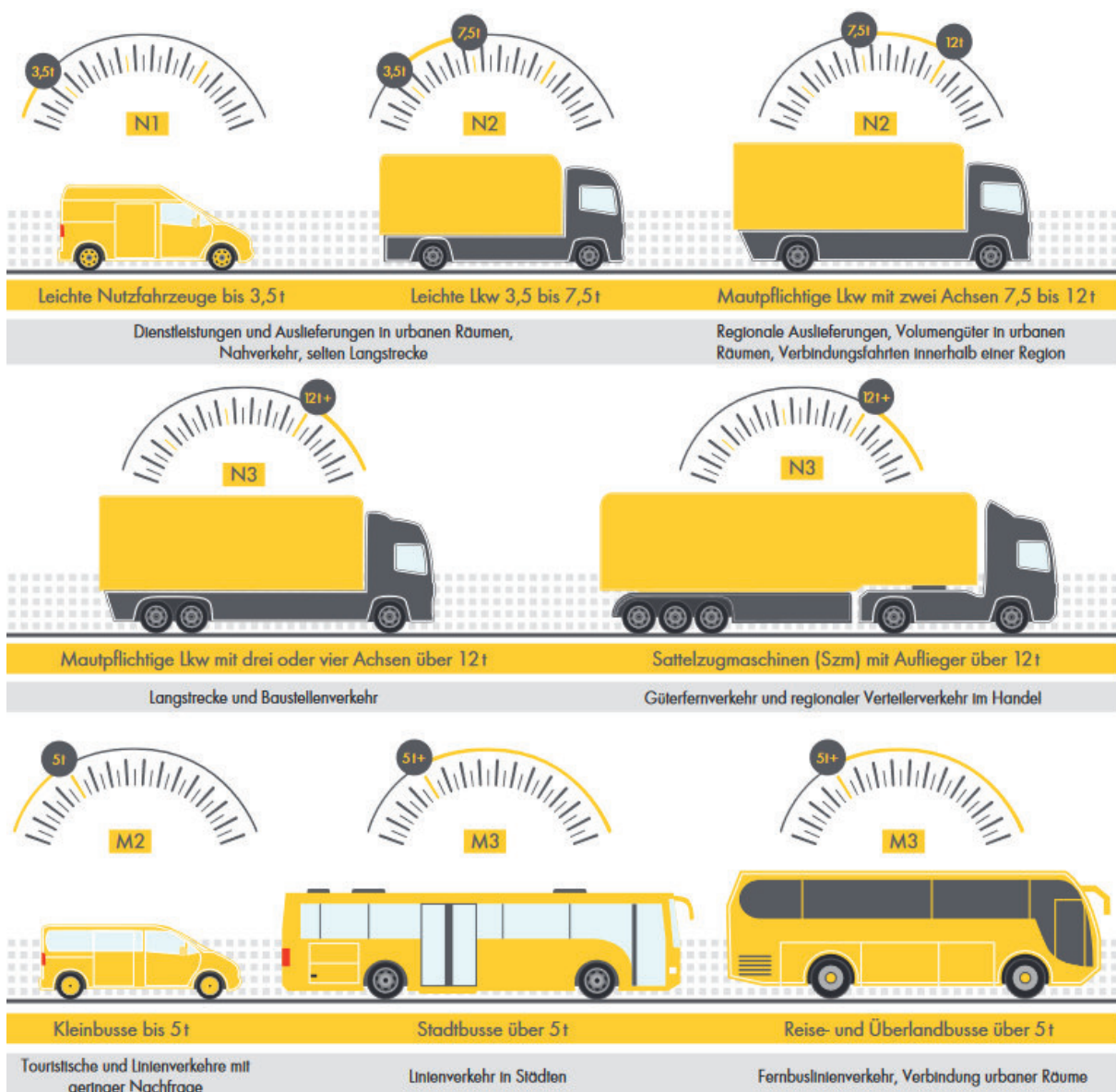


Abbildung 2-1: Nutzfahrzeugklassen und Typen [She-2016, S. 21]

In Deutschland sind insgesamt etwa 530.000 mittlere und schwere LKW (N2, N3) sowie etwa 220.000 Zugmaschinen (N3) im Einsatz [Eur-2023d]. Der Großteil der LKW im Einsatz sind leichte NFZ der Klasse N1 mit über 3 Millionen Fahrzeugen [Eur-2023d]. Leichte LKW sind vor allem in Städten zum Verteilverkehr oder im Handwerk im Einsatz. Mittelschwere LKW werden meist im Verteilverkehr zwischen Städten oder Verteilzentren oder, genauso wie schwere LKW, im Baugewerbe oder Fernverkehr eingesetzt (vgl. Abbildung 2-1) [VDA-2022a]. Die Wirtschaftlichkeit eines Transports wird meistens durch das Transportvolumen limitiert, aber gerade beim Transport schwerer Rohstoffe kann auch das zulässige Gesamtgewicht der limitierende Faktor sein [Ren-2021, S. 5]. Auf der Langstrecke sind deshalb vor allem schwere LKW im Einsatz [Hoe-2016, S. 163].

Busse können nach Fahrzeugart z.B. in Doppeldecker und Gelenkbusse oder nach Anwendung in Stadtbusse, Überlandbusse, Reisebusse und Kleinbusse eingeteilt werden (vgl. Abbildung 2-1) [Kra-2021b, S. 40]. Der Busmarkt ist sehr viel kleiner als der LKW-Markt. Der mittlere Bestand an Omnibussen in Deutschland liegt unter 80.000 Bussen [Kra-2022c, S. 9].

Der Fokus dieser Arbeit liegt auf Fahrzeugen zur Güter- und Personenbeförderung wie Busse und als Schwerpunkt LKW, die Teil des Portfolios eines NFZ-Herstellers wie Daimler Truck oder MAN Truck & Bus sind. Im Folgenden werden LKW, Sattelzugmaschinen und Transporter unter der Bezeichnung LKW zusammengefasst. Auf Spezialfahrzeuge wie Rettungswagen oder Müllfahrzeuge, auf Baufahrzeuge wie Bagger oder Mobilkrane, und auf landwirtschaftliche Fahrzeuge wie Traktoren oder Mähdrescher wird nicht gesondert eingegangen.

2.1.2 Aufbau von Nutzfahrzeugen

Ein LKW besteht aus dem Antriebssystem, dem Fahrgestell, der Kabine und zusätzlichen, integrierten Systemen (vgl. Abbildung 2-2) [Rol-2018b, S. 34]. Die Hauptkomponenten setzen sich wiederum aus Getriebe, Motor, Lenkung, Interieur, Räder, Reifen, Sicherheitsausstattung und vielen weiteren Bestandteilen zusammen [Hoe-2016, S. 206ff]. Insgesamt bestehen LKW zu fast 85 % aus Metallen, größtenteils Stahl und Eisen und zu geringen Teilen Aluminium [Sai-2018, S. 41; Pal-2020, S. 22]. Die restlichen Materialien sind beispielsweise Kunststoff, Gummi oder Elektronikkomponenten [Sai-2018, S. 41].

Je nach Transportaufgabe eines NFZ unterscheidet sich das Fahrzeug und der Aufbau oder die Kombination mit einem Anhänger (vgl. Abbildung 2-3) [Hoe-2016, S. 131]. Durch das modulare System entsteht eine große Variantenvielfalt und damit Komplexität. Je nach Einsatzzweck werden z.B. andere Kabinen, Motoren, Achsen, Getriebe und Radstände eingesetzt [Ren-2021, S. 9]. Darüber hinaus unterscheiden sich die Anforderungen der regionalen NFZ-Märkte und damit auch die Fahrzeugmerkmale weltweit, da Kundenanforderungen und Gesetzgebungen variieren [Hoe-2016, S. 131; Ren-2021, S. 8].

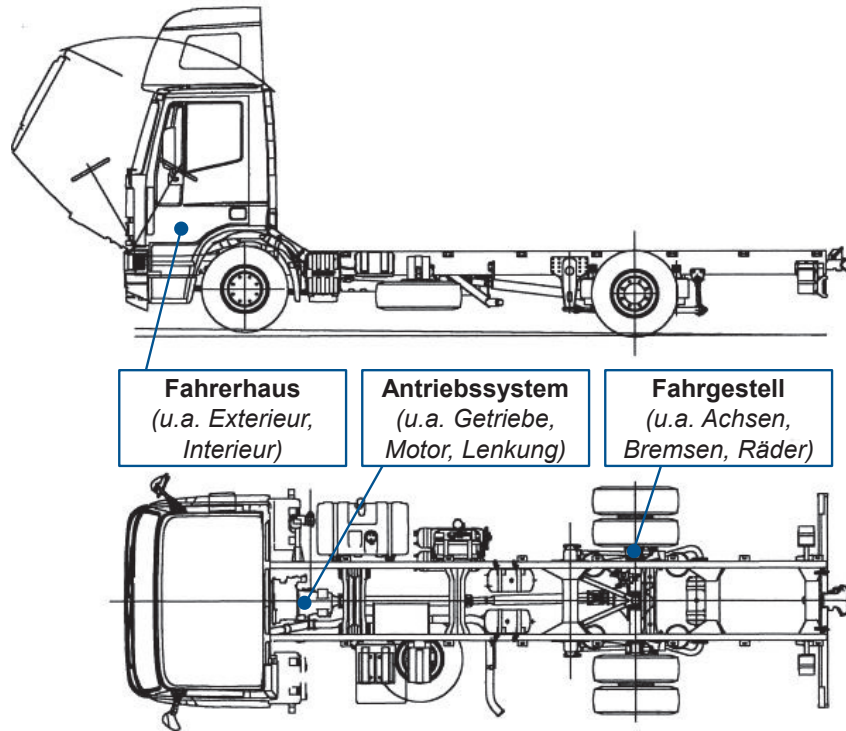


Abbildung 2-2: Zeichnung eines LKW mit Beschriftung der wichtigsten Komponenten (eigene Darstellung) [Hoe-2016, S. 211; Rol-2018b, S. 34]



Abbildung 2-3: Modellreihe elektrischer LKW von Volvo Trucks [Vol-2020]

Beim Antrieb der Fahrzeuge sind neben dem klassischen Verbrennungsmotor auch alternative Technologien mit Nutzung von Gas, Strom oder Wasserstoff möglich [Ren-2021, S. 34]. Mit dem Ziel der lokalen Emissionsfreiheit sind besonders batterieelektrische Antriebe (Battery Electric (BE)) und Brennstoffzellen (Fuel Cell Electric (FCE)) relevant. Die europäischen Original Equipment Manufacturer (OEM) verfolgen verschiedene Strategien. MAN Truck & Bus begrenzt sich auf Battery Electric Vehicles (BEV), während beispielsweise Daimler Truck und Volvo Trucks neben BEV auch gemeinsam an FCE-NFZ forschen [Beu-2022]. In den letzten Jahren steigt der Anteil an BE-NFZ auf dem Markt. 2022 gab es 43.768 BE-LKW in Deutschland, jedoch sind der Großteil LKW mit einer sehr geringen Nutzlast [Kra-2022b, S. 30]. Der Bestand an schweren, batterieelektrischen LKW stieg von 0 in 2018 auf 38 in 2022 [Kra-2018, S. 30]. Die Marktreife von FCE-NFZ ist bisher noch geringer [emo-2021, S. 6].

2.1.3 Einsatz von Nutzfahrzeugen

Mit der großen Vielfalt der Fahrzeuge und Einsatzzwecke geht auch eine sehr große Bandbreite an Laufleistungen, Betriebszeiten und Lebenserwartungen einher. LKW können in einem Jahr Distanzen erreichen, die PKW über ihre gesamte Lebensdauer fahren [Ren-2021, S. 2]. In Deutschland liegt die durchschnittliche Jahresfahrleistung für Sattelzugmaschinen bei etwa 90.000 km, für leichte und mittlere LKW jedoch bei unter 20.000 km [Kra-2022c, S. 9].

Je intensiver und effizienter der LKW als Investitionsgut des Betreibers genutzt werden kann, desto wirtschaftlicher ist es. Leerfahrten, nachdem die Ware am Zielort abgeliefert wurden, sind deshalb zu vermeiden. Trotzdem sind in Europa etwa 20 % der jährlichen Laufleistung Leerfahrten [Rol-2018a, S. 4]. Statt manueller Planung kann Digitalisierung helfen, die Komplexität zu bewältigen und die Ineffizienz zu senken [Rol-2018a, S. 10]. Vollständig vermeiden lassen sich Leerfahrten aufgrund asymmetrischer Warenströme nicht [Ren-2021, S. 68].

Besonders wichtig ist den Betreibern die Zuverlässigkeit der Fahrzeuge, da jeder Stillstand zu Verlust führt. Auch der Kraftstoffverbrauch sowie Wartung und Reparatur wirken sich stark auf die Profitabilität aus [emo-2021, S. 22]. Die Marge und damit der finanzielle Spielraum liegt nur bei etwa 0,1 bis 2 % [Ren-2021, S. 4; Nat-2021, S. 14]. Den größten Einfluss auf die Total Cost of Ownership (TCO), den Gesamtkosten während des Lebenszyklus eines NFZ, haben die Lohnkosten und die Ausgaben für Kraftstoff [Rol-2018a, S. 12; Ren-2021, S. 1]. Innovationen wie autonomes Fahren und effizientere Antriebssysteme setzen an diesem Punkt an, um die Kosten der Betreiber zu senken. Obwohl die meisten Kosten in der Nutzungsphase entstehen, kann der NFZ-OEM den Großteil der Kosten beeinflussen und damit die Wirtschaftlichkeit der Betreiber verbessern [Ren-2021, S. 4].

LKW sind meist über viele Jahre im Einsatz und werden oft nach einer gewissen Nutzungszeit weiterverkauft. Die Lebensdauer liegt in Europa im Durchschnitt bei 14,2 Jahren [ACE-2021, S. 12]. In Deutschland liegt das durchschnittliche Alter bei 9,7 Jahren, während in einigen Ländern Süd- und Osteuropas sehr viel ältere Fahrzeuge im Einsatz sind z.B. mit durchschnittlich 19 Jahren in Italien [ACE-2021, S. 12]. Beim Weiterverkauf haben LKW in Deutschland im Durchschnitt ein Alter von etwa 9 Jahren, Zugmaschinen von etwa 24 Jahren [Kra-2021a]. Während der langen Lebensdauern entwickeln sich die Technologien weiter, die nur in neuen Fahrzeugen Einsatz finden können [Sai-2018, S. 44].

2.1.4 Marktteilnehmer

Verschiedene Marktteilnehmer und Stakeholder nehmen Einfluss auf den NFZ-Sektor. Die grundsätzliche Wertschöpfungskette geht meist vom OEM über die Anhängerhersteller und weitere Dienstleister bis zum Flottenbetreiber und am Ende dem Transport der Ware

des Endkunden sowie dem Konsumenten der Ware. Daneben beeinflussen die Politik, konkurrierende Hersteller weltweit, die bestehende Infrastruktur und der Energiesektor den NFZ-Markt [BCG-2022, S. 10]. Die größten Märkte sind Europa, die USA und China, wo jedoch kaum Marktwachstum prognostiziert wird [BCG-2019, S. 1]. Die erfolgreichsten europäischen OEM von LKW sind Daimler Truck, TRATON mit den Marken Scania und MAN Truck & Bus, Volvo Trucks, DAF Trucks und IVECO [Rol-2018b, S. 29].

Sattelzugmaschinen werden meist vollständig durch den OEM gefertigt, während LKW meist als Fahrgestell ohne Aufbau vom OEM angeboten werden [Hoe-2016, S. 205]. In Aufbaubetrieben werden die LKW dann mit dem entsprechenden Aufbau je nach Nutzung versehen. Große Busse werden ebenfalls als Komplettfahrzeuge vom OEM produziert [Hoe-2016, S. 205]. Im Vergleich zum PKW machen die OEM mit dem eigentlichen Fahrzeug den Hauptumsatz, während bei PKW Sonderausstattungen eine größere Rolle spielen [Ren-2021, S. 3f].

Die Kundensegmente im NFZ-Sektor lassen sich je nach Fahrzeugtyp und Größe der Flotte einteilen. LKW werden zu 70 % an Flottenbetreiber unterschiedlicher Größen verkauft, für welche der Einsatz des LKW das Geschäftsmodell ausmacht. Das können Flotten von 10 bis über 100 Fahrzeuge sein. Andere Kundensegmente sind Einzelunternehmer z.B. Transportfahrzeuge von Handwerkern oder Spezialfahrzeuge. Die direkten Kunden können je nach Einsatz Einfluss auf die Gestaltung der Fahrzeuge nehmen. Genauso nehmen die Endkunden, deren Waren transportiert werden, indirekt Einfluss und stellen beispielsweise Anforderungen an die Emissionen oder Geräuschentwicklung. Auch die öffentliche Hand ist ein wichtiger Abnehmer von NFZ, besonders von Bussen im öffentlichen Personennahverkehr, während die kommunalen Betreiber bei LKW nur etwa 5-10 % ausmachen. Linienbusse werden durch die verschiedenen, meist kommunal betriebenen Verkehrsunternehmen mit spezifischer Ausstattung und oft mithilfe von Ausschreibungen nachgefragt. [Ren-2021, S. 7ff, 23]

2.1.5 Aktuelle Trends und Entwicklungen

In den Jahren 2020 und 2021 führte die Pandemie, resultierende Produktionskürzungen, die Störung der Lieferketten, die Knappheit von Vorprodukten und die gleichzeitig steigenden Preise für Rohstoffe und Energie zu Umsatzrückgängen in der NFZ-Industrie [VDA-2022b, S. 128ff]. Gleichzeitig stellen steigende Anforderungen an Klimaschutz, Digitalisierung und erhöhte Kundenanforderungen die Hersteller vor Herausforderungen.

Die drei wichtigsten technologischen Trends im NFZ-Sektor sind das autonome Fahren, die Digitalisierung und die Elektrifizierung [Rol-2018a, S. 5]. Diese bringen neue potenzielle Geschäftsmodelle mit sich. Ziel ist es, den NFZ-Betrieb sauber, sicher und vernetzt zu gestalten [Rol-2018b, S. 24]. Wie sich die Trends entwickeln, unterscheidet sich weltweit [BCG-2019, S. 1].

Autonomes Fahren kann in Zukunft die Effizienz steigern. So kann autonomes Fahren und Platooning die Betriebskosten und den Treibstoffverbrauch auf der Langstrecke senken [Rol-2018a, S. 8]. Zusätzlich gibt es aktuell einen Mangel an LKW-Fahrern, vor allem auf der Langstrecke, dem entgegengewirkt werden kann [Rol-2018a, S. 4].

Die Digitalisierung bringt neue Player in den NFZ-Markt und führt zu größeren Partnernetzwerken. Hersteller können neben dem Fahrzeugverkauf zusätzliche, fahrzeugnahe Dienstleistungen oder digitale Angebote wie ein optimiertes Flottenmanagement anbieten. Telematik ermöglicht die Sammlung, Nutzung und Monetarisierung der erfassten Daten. Auch sind Modelle wie der Verkauf von Transportkapazität statt Fahrzeugen oder Pay-per-Use für einzelne Funktionen oder ganze Fahrzeuge möglich. [Ren-2021, S. 47, 57]

Die Elektrifizierung führt zu alternativen, vorrangig batteriebetriebenen Antrieben zur Reduzierung der Emissionen und Erfüllung der Klimaziele und -gesetze. In den vergangenen Jahren lag der Fokus auf der Optimierung des Antriebsstrangs und der Reduzierung des Treibstoffverbrauchs und der Emissionen des Verbrennungsmotors [Ren-2021, S. 30f]. Nun hat sich der Fokus auf alternative Antriebe verschoben. Die Elektrifizierung findet in Wellen statt, wobei Busse und leichte LKW zuerst elektrisch angetrieben werden [BCG-2022, S. 5]. In Städte kommen auf der Kurzstrecke BEV zum Einsatz und sorgen für lokale Emissionsfreiheit. Auf der Langstrecke stellt die Reichweite und die damit verbundene Größe der Batterie die Hersteller noch vor Herausforderungen, da ein höheres Gewicht die mögliche Zuladung verringert [Bur-2019, S. 7]. Hier wird ein stärkerer Einsatz von Wasserstoff prognostiziert [BCG-2019, S. 3]. Eine weitere Herausforderung ist die benötigte (Lade)-Infrastruktur [VDA-2022a].

Alle drei Trends können Verbesserung der ökologischen Nachhaltigkeit mit sich bringen. Leerfahrten werden reduziert, die Effizienz der Routen optimiert, der Verbrauch verbessert und durch vorausschauende Wartung die Nutzungszeit erhöht. Dekarbonisierung steht im Fokus, während CE in Studien zur Nachhaltigkeit von NFZ oft keine Rolle spielt [Tra-2017, S. 3]. Aufgrund der hohen Lebensfahrdauer und Lebensfahrleistung der NFZ hat die Nutzungsphase den größten Einfluss auf die Ökobilanz der Fahrzeuge. Die THG über den gesamten Lebensweg eines Busses oder LKW mit klassischem Dieselantrieb stammen laut [Umw-2022b] zu über 90 % aus der Verbrennung des Kraftstoffs und der vorgelagerten Kraftstoffaufbereitung [Umw-2022b, S. 9ff]. BE-NFZ können je nach Zusammensetzung des Stroms und anderer Einflussfaktoren bis zu 89 % weniger THG verursachen [Umw-2022b, S. 9ff]. Ziel des Klimaschutzprogramms für klimafreundliche NFZ in Deutschland ist, bis 2030 ein Drittel des Straßengüterverkehrs auf alternative Antriebe mit strombasierten Kraftstoffen umzustellen [BMV-2020, S. 5]. Die europäischen NFZ-Hersteller planen bis 2040 keine NFZ mit Verbrennungsmotor mehr zu verkaufen [Ren-2021, S. 30].

2.2 Kreislaufwirtschaft in der Theorie

Um die CE im NFZ-Sektor näher zu betrachten, soll zunächst die Bedeutung von CE dargestellt und die damit verbundenen Ziele und Herausforderungen eingeordnet werden. Weiter werden existierende Frameworks zu CE-Strategien sowie Metriken zur Ermittlung der Zirkularität und der Bemessung des Erfolgs möglicher Maßnahmen erläutert. Es wird betrachtet, welche politische Vorgaben die Entwicklung in Richtung CE prägen und welche weiteren Herausforderungen sowie Chancen mit CE einhergehen. Die theoretischen Grundlagen werden im nächsten Kapitel um praktische Beispiele für CE-Ansätze ergänzt.

2.2.1 Begriffsbestimmung und Einordnung

Nachhaltigkeit steht aktuell im Fokus der Aktivitäten in Politik, Wirtschaft und Gesellschaft [Pap-2023]. Oft wird Nachhaltigkeit im ersten Schritt mit erneuerbaren Energien verbunden, jedoch sind die damit erzielbaren Einsparungen nicht groß genug, um aktuelle Klimaziele zu erreichen [Mat-2018, S. 15f]. Weitere Einsparungen ermöglicht der Übergang zur CE [Mat-2018, S. 15f]. Das aktuelle lineare Wirtschaftssystem ist nicht nachhaltig, da es darauf basiert, dass Ressourcen stets verfügbar sind. Dies ist jedoch nicht der Fall, da bereits jetzt weit mehr Ressourcen verbraucht werden, als die Erde zur Verfügung stellen kann [EEA-2016, S. 9].

Die Umstellung vom linearen Wirtschaftssystem auf die CE als regeneratives Wirtschaftssystem umfasst den nachhaltigen Umgang mit Ressourcen durch Minimieren, Verlangsamern und Schließen von Kreisläufen [Sti-2021, S. 1ff]. Neben ökologischen Verbesserungen durch geringe Umweltbelastung werden mit CE wirtschaftliche und auch soziale Vorteile wie neue Arbeitsplätze, Innovationen, Wirtschaftswachstum, geringere Materialkosten und geringere Abhängigkeit von Importen verbunden [EEA-2016, S. 12ff].

Eine allgemeingültige Definition der CE gibt es nicht [Sai-2018, S. 4; DIN-2023, S. 45]. Je nach Studie liegt der Fokus beispielsweise stärker auf dem Ressourcenkreislauf oder auf der CE als neues Wirtschaftssystem [Tam-2020, S. 35]. Genauso lässt sich kein allgemeingültiges Vorgehen bei der Umstellung auf CE für alle Unternehmen und Produkte jeder Branche finden [Bra-2021, S. 8]. Jedes Produkt hat individuelle Eigenschaften und CE-Maßnahmen können an allen Punkten des jeweiligen Produktlebenswegs ansetzen [Pot-2016, S. 10]. So wie jedes Unternehmen seine eigene Unternehmensstrategie hat, ist auch eine individuelle CE-Strategie als Teil davon notwendig. Ansatzpunkte für Unternehmen können z.B. die Effizienz ihrer Prozesse, die Bereitstellung zirkulärer Dienstleistungen, die Veränderung des Produktdesigns hin zu nachhaltigen und kreislaforientierten Produkten oder die Neugestaltung von Geschäftsmodellen sein [Sti-2021, S. 3].

Mit dem Wandel zur CE wird ein erhebliches Wirtschaftswachstum vorhergesagt [Eil-2015, S. 12]. Für Unternehmen bedeutet es, neue, innovative Geschäftsmöglichkeiten aufzudecken,

konkurrenzfähiger zu werden und Kosten einzusparen [EEA-2016, S. 13]. Ineffizienzen der linearen Wirtschaft, wie der Einsatz von nicht wiederverwendbaren Materialien, der unvollständigen Nutzung der Funktionen von Produkten oder der Entsorgung von Materialien ohne Zurückgewinnung, können vermieden werden [Nor-2021, S. 11]. Besonders bei produzierenden Unternehmen machen Materialkosten einen erheblichen Teil der Ausgaben aus und können durch Materialkreisläufe reduziert werden [Eur-2020d, S. 4]. Weitere Treiber neben potenziellen Umsatz- bzw. Einsparungsmöglichkeiten und dem Erreichen von Klimazielen sind das gesteigerte Bewusstsein der Endkunden, gesetzlicher Druck, politische Vorgaben und Förderungen [acc-2020, S. 7]. Neue Technologieentwicklungen machen die Veränderungen erst möglich [Ell-2015, S. 12].

Ideales Ziel der CE ist ein geschlossener Kreislauf, bei dem recyceltes Material im selben Produkt wieder eingesetzt werden kann und zu gleichbleibender Qualität führt. Dabei sollen möglichst keine neuen Ressourcen benötigt werden und Materialien wieder und wieder verwendet werden können. Doch bisher funktioniert die deutsche Wirtschaft nur zu 10,4 % zirkulär [BCG-2020, S. 4]. Die Recyclingquote in Deutschland liegt bei 81 % des Abfalls, jedoch wird auch Müllverbrennung zur Energieproduktion und Export des Abfalls als Recycling gezählt [BCG-2020, S. 9]. Beides führt dazu, dass die Materialien nicht erneut wiederverwendet werden und die Bildung eines Kreislaufs verhindert wird. Gleichzeitig ist das Erreichen des idealen Kreislaufes in der Realität fast nicht möglich [Pot-2016, S. 10]. Auch bei geringen Verluste sind nach jahrelangem Recycling nur noch erheblich kleinere Mengen des Materials nutzbar, weshalb auch in Zukunft weiterhin neues Rohmaterial benötigt wird [EEA-2016, S.25].

CE soll nicht nur den Materialeinsatz und die Abfallmengen, sondern auch den Energiebedarf und die Emissionen reduzieren. Es kann jedoch je nach CE-Maßnahme vorkommen, dass in einem geschlossenen Kreislauf mehr Energie verbraucht wird als durch die Produktion neuer Rohstoffe und die negativen Umweltwirkungen folglich höher sind [Pot-2016, S. 14]. Etablierte Bewertungsmethoden wie Lebenszyklusanalysen (LCA) können helfen, die Umweltwirkungen einer Maßnahme zu prüfen [Sti-2021, S. 5]. Weiterhin können Nachteile in andere Lebenswegphasen verlagert werden wie z.B. Veränderungen im Design, die zwar die Umweltwirkungen in der Nutzungsphase verringern, aber das Recycling erschweren [Soo-2021]. Mehr Zirkularität in einer Werkstoffkette kann auch negative Auswirkungen auf den Kreislauf anderer Werkstoffketten haben [Pot-2016, S. 14]. Bei der Betrachtungen von CE-Maßnahmen soll folglich immer das übergeordnete Ziel der Nachhaltigkeit präsent sein und alle Rebound- und Sekundäreffekte der Maßnahmen betrachtet werden [Pot-2016, S. 14].

2.2.2 Circular Economy Frameworks

Maßnahmen zum schrittweisen Erreichen der CE lassen sich je nach Grundgedanken, Strategie und Ansatzpunkt clustern. Drei Modelle mit unterschiedlichen Arten der Unterteilung werden an dieser Stelle kurz erläutert [Bra-2021, S. 8]:

- Butterfly-Diagramm und ReSOLVE-Modell** [Ell-2015, S. 24ff, 46ff]: Laut [Ell-2015] basiert die CE auf den drei grundlegenden Prinzipien: der Bewahrung und Steigerung des Werts des Ökosystems, der Optimierung der Nutzung von Ressourcen und der Steigerung der Systemeffektivität. Darauf aufbauend wird der gesamte Lebenszyklus eines Produkts inklusive potenzieller CE-Maßnahmen im Butterfly-Diagramm dargestellt und in den biologischen und den technischen Kreislauf unterteilt, wie in Abbildung 2-4 in grün bzw. blau dargestellt. Im technischen Kreislauf sind maintain/prolong, reuse/redistribute, refurbish/remanufacture und recycle vier mögliche Wege, um den Kreislauf mit verschiedenen Ansatzpunkten wieder zu schließen. Aus den drei grundlegenden Prinzipien lassen sich 6 wirtschaftliche Aktivitäten ableiten, die das ReSOLVE-Framework ergeben. Diese Aktivitäten sind Regenerate, Share, Optimise, Loop, Virtualise und Exchange.

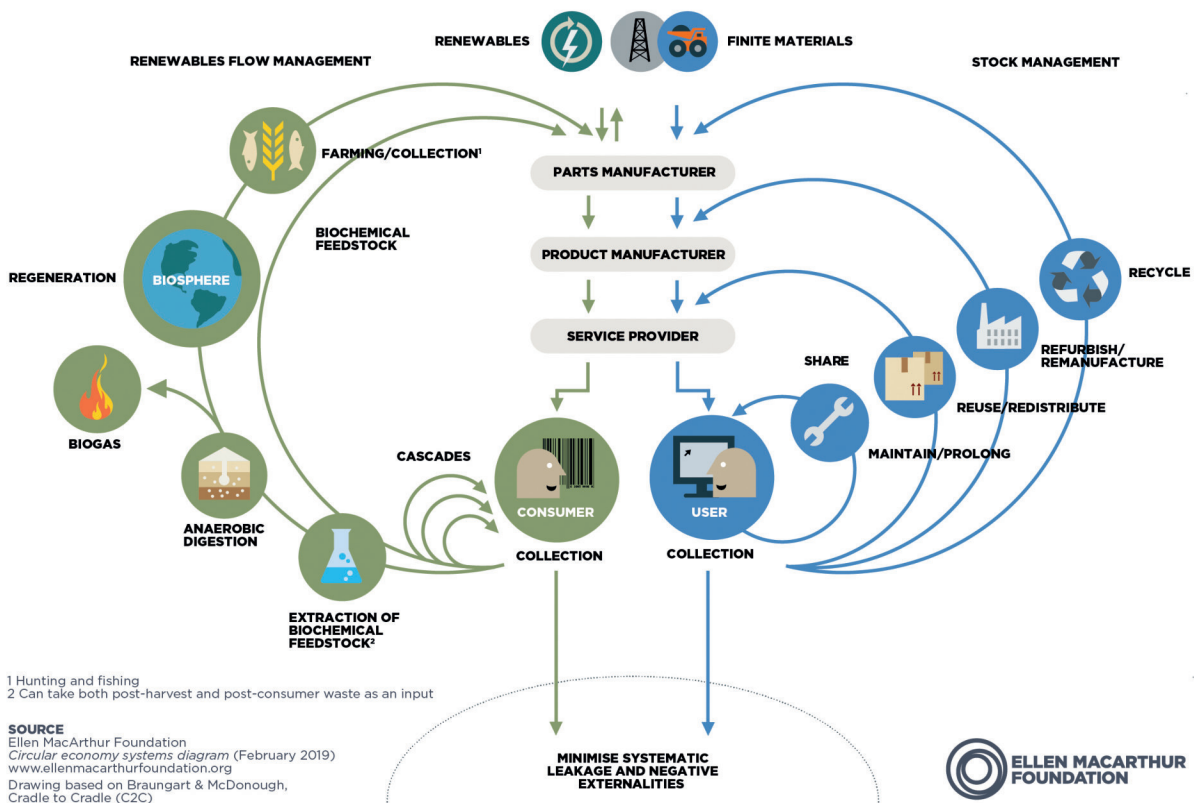


Abbildung 2-4: Butterfly-Diagramm der Ellen MacArthur Foundation [Ell-2015, S. 24]

- **9R-Modell** [Pot-2016, S. 15]: Im 9R-Modell werden 10 verschiedene CE-Strategien unterschieden (vgl. Abbildung 2-5). Dabei steigt von R9 - Recover bis R0 - Refuse die Zirkularität und der Einsatz an Ressourcen sowie die Umweltwirkungen reduzieren sich, wobei dies je nach Umsetzung im Einzelfall abweichen kann. Die Strategien Recover (R9) und Recycle (R8) sorgen für eine verbesserte Nutzung von Ressourcen, die Strategien Repurpose (R7), Remanufacture (R6), Refurbish (R5), Repair (R4) und Reuse (R3) verlängern die Lebensdauer von Produkten und die Strategien Reduce (R2), Rethink (R1) und Refuse (R0) sorgen für eine verbesserte Produktion und Produktnutzung. Die kurzen Erläuterungen der Strategien in Abbildung 2-5 orientieren sich an [DIN-2023, S. 26] und damit an den Definitionen der UN. Die Strategien sind nicht eindeutig definiert, nicht immer klar abzugrenzen und bauen zum Teil aufeinander auf. Das beste Ergebnis kann durch die Kombination mehrerer Strategien erreicht werden. Neben dem 9R-Modell existieren verschiedene R-Modelle mit unterschiedlichen Anzahlen an Strategien.

Steigende Zirkularität	R0 Refuse	Verzicht, Ersatz durch radikal andere Lösung, Reduktion des Rohstoffeinsatzes
	R1 Rethink	Umdenken, systemische Sicht, neue Geschäftsmodelle, Nutzungsintensivierung
	R2 Reduce	Reduktion, Design for Circularity, höhere Effizienz, geringerer Verbrauch
	R3 Reuse	Wiederverwendung für denselben Zweck (z.B. nach Reparatur oder Instandsetzung)
	R4 Repair	Reparatur eines defekten Produkts für weitere Nutzung mit ursprünglicher Funktion
	R5 Refurbish	Instandsetzung / Aufarbeitung eines alten Produkts auf bestimmtes Qualitätsniveau
	R6 Remanufacture	Wiederaufbereitung, Einsatz alter Teile in neuem Produkt mit gleicher Funktion
	R7 Repurpose	Umnutzung, Einsatz von Produkt / Teilen in neuem Produkt mit anderer Funktion
	R8 Recycle	Stoffliche Verwertung, Rückgewinnung von Materialien zur Wiederaufbereitung
	R9 Recover	Verwertung, Energierückgewinnung

Abbildung 2-5: CE-Strategien des 9R-Modells (eigene Darstellung nach [Pot-2016; DIN-2023])

- **Material Economics-Modell** [Mat-2018, S. 5ff]: In diesem Modell werden alle potenziellen CE-Maßnahmen drei verschiedenen Kategorien zugeordnet. Die Kategorie „Materials Recirculation“ umfasst Maßnahmen, die einen geschlossenen Materialkreislauf fördern. Maßnahmen in der Kategorie „Product Materials Efficiency“ haben das Ziel, den Materialeinsatz insgesamt zu verringern. Mit „Circular Business Models“ werden Maßnahmen zusammengefasst, die die Nutzung optimieren.

Diese Clusterungen können die Grundlage für die Entwicklung neuer Geschäftsmodelle und die Identifizierung passender CE-Maßnahmen für spezifische Produkte darstellen. Dabei lässt sich nicht jede Strategie auf jedes Unternehmen und Produkt anwenden. Weiterhin können nicht unbedingt alle Strategien gleichzeitig verfolgt werden. [Sti-2021, S. 4ff]

2.2.3 Metriken und Reifegradmodelle

Um geeignete CE-Maßnahmen zu identifizieren und umzusetzen, muss zunächst der aktuelle Stand der CE-Aktivitäten sowie das angestrebte Ziel des Unternehmens bekannt sein. Im nächsten Schritt können CE-Geschäftsmöglichkeiten erarbeitet und deren Potenziale abgeschätzt werden. Nach der Umsetzung von CE-Maßnahmen sollen diese validiert und die realen Verbesserung erfasst und verfolgt werden. [Cir-2020, S. 9ff]

Für alle Schritte wurden verschiedene Metriken mit einer Vielzahl unterschiedlicher Indikatoren entwickelt. Einige Metriken werden als Tool angeboten, um Unternehmen die Anwendung zu erleichtern. Während die meisten Metriken noch nicht etabliert sind, ist z.B. das Cradle-to-Cradle-Zertifikat, welches sichere und nachhaltige Produkte zertifiziert, bereits standardisiert. Die Indikatoren innerhalb der Metriken setzen an verschiedenen Ebenen an. So kann übergeordnet z.B. der Anteil an kritischen Rohstoffen im Produkt betrachtet werden. Eine Ebene darunter kann durch Indikatoren deutlich werden, was in der Wertstoffkette verändert werden müsste, um diesen Anteil zu reduzieren. Wiederum andere Indikatoren helfen festzustellen, was im Unternehmen getan werden muss, um diese Veränderung in der Werkstoffkette zu realisieren. [Cir-2020, S. 10ff]

Als Rahmen zur Beurteilung des aktuellen Stands der CE-Aktivitäten können Reifegradmodelle für CE genutzt werden. Dabei reicht der Reifegrad von Linearität zu vollständiger Zirkularität, wobei oft in fünf Stufen unterteilt wird. Beispielsweise nennt [Ace-2021, S. 380] die Level: Linearity, Industrial CE Piloting, Systems Materials Management, CE Thinking, Full Circularity. Je nach Literatur variieren die Kriterien, die für das Erreichen des höchsten CE-Reifegrads erfüllt sein müssen. Nach [Gar-2019] muss ein Unternehmen dafür nicht nur CE in die gesamte Wertschöpfungskette integrieren, sondern auch andere Unternehmen zur CE inspirieren und zur Entwicklung neuer Technologien beitragen. [Krü-2022, S. 28ff]

2.2.4 Politische und rechtliche Vorgaben

Die Gestaltung des Übergangs zur CE wird stark von politischen Vorgaben und rechtlichen Rahmenbedingungen beeinflusst. Durch die EU werden CE-Strategie und Ziele vorgegeben, Richtlinien und Verbote verabschiedet, Produkthanforderung festgelegt und mit speziellen Steuern, Förderungen und finanziellen Anreizen das Verhalten beeinflusst. Öffentliche Investitionen in die Infrastruktur oder neue Technologien können die Veränderung beschleunigen und Partnerschaften politisch gefördert werden. [Lac-2020, S. 312ff]

Die EU hat 2019 den Green Deal verabschiedet, der die Klimaneutralität und Zirkularität der europäischen Wirtschaft bis 2050 anstrebt [Eur-2019a, S. 2]. 2020 wurde der Circular Economy Action Plan von der EU weiterentwickelt, der die durch den Green Deal geforderten Veränderungen in Richtung CE beschleunigen soll [Eur-2020d, S. 4f]. Beispielsweise werden für den Fahrzeugsektor Maßnahmen genannt, um das Recycling und den Rezyklatanteil

der Antriebsbatterien zu verbessern [Eur-2020a, S. 9]. Den ersten Circular Economy Action Plan hatte die EU bereits 2015 erarbeitet [Eur-2015]. Ebenfalls 2020 wurde ein Plan zur Sicherstellung der Sicherheit und Nachhaltigkeit von kritischen Rohstoffen in der EU entwickelt, wobei die Ressourcensicherheit auch durch Schritte in Richtung CE verbessert werden soll [Eur-2020c, S. 10ff]. Das Europäische Klimagesetz wurde 2021 verabschiedet, um die Erreichung der Ziele des Green Deals sicherzustellen [EU-2021]. Zur Überwachung des Fortschritts in Richtung CE in der EU wurde 2018 ein „Circular Economy Monitoring Framework“ mit 10 Indikatoren festgelegt [Eur-2018b, S. 3]. Diese kommen aus den Bereichen Produktion und Verbrauch, Abfallwirtschaft, Sekundäre Rohstoffe, Wettbewerbsfähigkeit und Innovation [Eur-2018b, S. 3]. Dabei werden unter anderem auch der Anteil recycelter Materialien am gesamten Bedarf, die Nutzungsrate wiederverwendbarer Stoffe, deren Handel und das Recycling von Verpackungsabfällen betrachtet [Eur-2018a, S. 32ff].

In Deutschland wurde 2019 das Klimaschutzprogramm 2030 verabschiedet, 2021 erweitert und 2022 das Klimaschutz Sofortprogramm beschlossen. [Deu-2022, S. 9] Bis 2024 soll eine nationale Kreislaufwirtschaftsstrategie erarbeitet werden, um Ressourceneinsatz, Abfall und Emissionen zu verringern [Deu-2022, S. 42]. Für die Zielerreichung soll durch [DIN-2023] ein Rahmen für Normung und Standardisierung zirkulärer Aktivitäten geschaffen werden [DIN-2023, S. 4].

Eine Auswahl an Verordnungen, Richtlinien und Gesetzen auf nationaler Ebene sowie EU-Ebene zum Thema CE sind das nationale Kreislaufwirtschaftsgesetz, die Deponieverordnung, das Batteriegesetz, die Ökodesign-Richtlinie für das Produktdesign und das Recht auf Reparatur, welches noch erarbeitet wird (vgl. Abbildung 2-6) [Sti-2021, S. 48ff]. Die Ökodesign-Richtlinie wird derzeit im Rahmen der „Sustainable Products Initiative“ überarbeitet, wodurch auch die Zirkularität der Produkte stärker gefordert wird. Produkte sollen „durable, reliable, reusable, upgradable, repairable, easier to maintain and refurbish, and energy and resource efficient“ [Eur-2022] sein.

Speziell für Fahrzeuge gelten die Richtlinie über Altfahrzeuge, Vorgaben zur Reparatur von Fahrzeugen sowie die Verordnung über THG-Flottengrenzwerten (vgl. Abbildung 2-7) [Bra-2021, S. 12]. Je nach Richtlinie unterscheidet sich die Geltung für PKW und NFZ. Aktuelle Vorgaben zu Emissionsgrenzen wie Euro VI gibt es sowohl für PKW, leichte als auch schwere NFZ [Umw-2021]. Diese wurden für schwere LKW erst mit dem dritten Mobilitätspaket 2018 festgelegt [Eur-2020e, S. 41]. Die EU gibt das Ziel vor, dass die Emissionen schwerer NFZ bis 2030 um 45 % und bis 2040 um 90 % gesenkt werden sollen, womit eine entsprechende Steigerung des Anteils alternativer Antriebe einhergehen muss [Eur-2023a]. Weiterhin gelten schon seit Jahren Richtlinien wie die Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals (REACH) oder Waste Electrical & Electronic Equipment (WEEE) für alle Teile und Fahrzeuge [Sai-2018, S. 36]. 2018 wurden die Richtlinien über Altfahrzeuge, Altbatterien und WEEE mit Fokus auf die CE geprüft und geändert [EU-2018b].

Eine aktuelle Auflistung aller EU-Richtlinien und -Verordnungen, die für Fahrzeuge je nach Klasse (vgl. Kapitel 2.1.1) gelten, findet sich in [ACE-2022, S. 15ff] und ausgewählte Vorgaben sind in den Abbildungen 2-6 und 2-7 dargestellt.

	Richtlinie	Inhalt
Allgemeiner Geltungsbereich	Verordnung (EG) Nr. 1907 / 2006	REACH (Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung chemischer Stoffe)
	Richtlinie 2012 / 19 / EU (Neufassung, u.a. der Richtlinie 2002 / 96 / EG)	WEEE (Elektro- und Elektronik-Altgeräte)
	Richtlinie 2011 / 65 / EU (Neufassung, u.a. der Richtlinie 2008 / 35 / EG)	RoHS (Beschränkung der Verwendung von gefährlichen Stoffen in Elektro- und Elektronikgeräten)
	Richtlinie 2006 / 66 / EG, neue Verordnung geplant (2023)	Batterien und Altbatterien
	Richtlinie 2009 / 125 / EG	Ökodesign (Anforderungen an umweltgerechte Gestaltung energieverbrauchsrelevanter Produkte)
	Verordnung (EU) Nr. 2021 / 1119	Europäisches Klimagesetz
	Richtlinie (EU) 2018 / 850	Abfalldeponien
	Richtlinie 2008 / 98 / EG	Abfallrahmenrichtlinie

Abbildung 2-6: Ausgewählte Richtlinien und Verordnungen der EU (eigene Darstellung) [Sai-2018, S. 36; ACE-2022, S. 15ff]

	Richtlinie	Inhalt
Speziell für Fahrzeuge	Verordnung (EG) Nr. 715 / 2007; Verordnung (EG) Nr. 595 / 2009	Begrenzte Emissionen der Fahrzeuge (Euro 5, Euro 6)
	Verordnung (EU) Nr. 2020 / 740	Kennzeichnung von Reifen (u.a. bzgl. Kraftstoffeffizienz)
	Richtlinie 2000 / 53 / EG	Altfahrzeuge (ELV-Richtlinie) inkl. EPR (erweiterte Herstellerverantwortung)
	Richtlinie 2005 / 64 / EG	Vorgaben zu Wiederverwendbarkeit, Recyclingfähigkeit und Verwertbarkeit

Nur für M1 & N1

Abbildung 2-7: Ausgewählte Richtlinien und Verordnungen der EU geltend für Fahrzeuge (eigene Darstellung) [Sai-2018, S. 36; ACE-2022, S. 15ff]

Die End of Life Vehicle Directive (ELV-Richtlinie) gilt aktuell nur für Fahrzeuge der Klassen M1 und N1 (vgl. Abbildung 2-7), weshalb das Lebensende von schweren NFZ nicht reguliert wird [EU-2018a, S. 2]. Für leichte Fahrzeuge wird in der ELV-Richtlinie festgelegt, dass Fahrzeuge „zu mindestens 85 Gewichtsprozent je Fahrzeug wiederverwendbar und/oder recyclingfähig und zu mindestens 95 Gewichtsprozent je Fahrzeug wiederverwendbar und/oder verwertbar sein müssen“ [EU-2018a, S. 9]. Weiterhin müssen Demontageanleitungen verfügbar sein und die Fahrzeuge zurückgenommen werden. Die Erweiterung des Geltungsbereichs der ELV-Richtlinie auf schwere NFZ ist in Diskussion, wird jedoch auch kritisch gesehen [ACE-2020,

S. 1]. Ergänzend zur ELV-Richtlinie wurde die Richtlinie 2005/64/EC verabschiedet, die regelt, dass in der EU nur weiterverwendbare und recycelbare PKW verkauft werden, aber welche ebenfalls nicht für NFZ gilt [Eur-2018c, S. 52]. Genauso bezieht sich die erweiterte Herstellerverantwortung (EPR) zwar auf Teile wie die elektronischen Geräte aber nicht auf das gesamte NFZ [Sai-2018, S. 36].

Für NFZ gilt z.B. die Förderung von alternativen Antrieben und der benötigten Infrastruktur [BMV-2015]. Beispielsweise werden Abweichungen bei den Grenzen für Länge und Gewicht der Fahrzeuge erlaubt, um sicherzustellen, dass auch bei schwereren alternativen Antrieben die gleiche Menge an Gütern geladen werden kann [EU-2015, S. 2]. Bei BE-NFZ muss die Batterieverordnung eingehalten werden, für die 2020 eine Aktualisierung vorgeschlagen wurde, die voraussichtlich in diesem Jahr verabschiedet wird [Eur-2020b; hes-2020]. Darin werden Mindestanteile an recycelten Materialien ab 2030, höhere Sammelquoten und die Informationspflicht über den Kohlenstoffdioxid (CO₂)-Fußabdruck der Traktionsbatterie gefordert [Eur-2020b, S. 58, 60, 91]. Die NFZ-Hersteller haben dann die EPR für die Batterie und müssen sich mit dem gesamten Lebenszyklus inklusive des Lebensendes der Batterie und damit auch der Fahrzeuge beschäftigen.

2.2.5 Chancen und Erfolgsfaktoren

Bei Betrachtung der Einflüsse von CE-Aktivitäten auf das umsetzende Unternehmen ergeben sich viele Chancen. CE-Maßnahmen können das Erreichen von Nachhaltigkeitszielen erleichtern, die Transparenz von Prozessen und Produkten verbessern, die Kundenbindungen erhöhen sowie die Glaubwürdigkeit stärken. Außerdem werden neue Geschäftsmodelle möglich, Kosten können reduziert werden und neue Kooperationen und Netzwerke entstehen. [Sti-2021, S. 145ff]

CE kann in Unternehmen nur erfolgreich ganzheitlich angegangen werden, wenn dafür die notwendigen Voraussetzungen geschaffen werden. Die Transformation zur CE wird durch Umdenken und Umgestalten der Produkte und Dienstleistungen, des Betriebs inklusive der Nebenerzeugnisse, der Unternehmenskultur und -organisation sowie durch den Aufbau eines Ökosystems möglich [Lac-2020, S. 207]. Erfolgsfaktoren sind beispielsweise die Offenheit und Lernbereitschaft der Belegschaft, ihre Fortbildung und die enge Zusammenarbeit zwischen den verschiedenen Fachbereichen wie z.B. Vertrieb und Kundenservice [Sti-2021, S. 73ff]. Innovation soll offen und abteilungsübergreifend stattfinden, Anreize geschaffen und CE-Ideen der Mitarbeiter gefördert werden [Lac-2020, S. 260]. Ideen sollen möglichst in Pilotprojekten umgesetzt und das Konzept damit validiert werden, bevor sie auf andere Produkte oder Standorte ausgeweitet werden [Sti-2021, S. 76ff]. Der nötige kulturelle und strukturelle Wandel im Unternehmen umfasst, dass CE in die Strukturen des Unternehmens integriert,

bei allen Unternehmensentscheidungen mitbetrachtet und Ergebnisse transparent kommuniziert werden [Sti-2021, S. 76ff]. Klare CE-Ziele sollen Teil der Unternehmensstrategie sein und sich in Vision und Mission wiederfinden [Lac-2020, S. 278].

Über die Grenzen des Unternehmens hinaus sind Kooperationen zwischen Industrien und ein gutes Netzwerk zu Partnern wie Entsorgungsunternehmen, öffentlichen Behörden und anderen Dienstleistern ein wichtiger Erfolgsfaktor [Sti-2021, S. 76ff]. CE-Netzwerke z.B. von der Ellen MacArthur Foundation zum Teilen von Wissen und Erfahrungen können helfen, sich mit Unternehmen aus anderen Sektoren zu verbinden und Handlungsempfehlungen zu erhalten [Nor-2021, S. 77]. In einem CE-Ökosystem lassen sich gemeinsam mit Partnern aus verschiedenen Industrien gebündelte Angebote schaffen, die den Wert für den Kunden steigern, Produkte erweitern und attraktiver gestalten und ganze Lösungen statt einzelner Dienstleistungen umfassen [Nor-2021, S. 122ff].

Digitalisierung kann den Fortschritt in Richtung CE unterstützen. Zukunftstechnologien wie Künstliche Intelligenz (KI) und Machine Learning können die Effizienz steigern, das Internet der Dinge die Grundlage für Sharing-Plattformen bilden und durch Blockchain die Transparenz verbessert werden [pwc-2019, S. 30]. Die Erfassung und Auswertung von Echtzeitdaten unterstützt die Transformation zur CE, kann gleichzeitig Kosten senken oder die Daten können monetarisiert werden [Nor-2021, S. 73f]. Neben digitalen Technologien können auch physikalische und biologische Technologien die CE unterstützen, wie 3D-Druck, Energy Harvesting oder bio-basierte Materialien [Lac-2020, S. 54].

2.2.6 Herausforderungen

Herausforderungen für umsetzende Unternehmen sind mögliche Mehrkosten durch CE-Strategien, administrative Hürden, eine eingeschränkte Verfügbarkeit von Rezyklat oder schlechte Recyclingfähigkeiten der Materialien. Kunden sind meist nicht bereit höhere Preise für zirkuläre Produkte zu bezahlen und fürchten mangelnde Qualität, wodurch es zu einer Ablehnung kommen kann. Weiterhin fehlt teilweise die nötige Infrastruktur und internationale Lieferketten können aufgrund regionaler Unterschiede der CE-Regelungen hemmend wirken. [Sti-2021, S. 150ff]

Mit neuen CE-Geschäftsmodellen wie Product-as-a-Service (PaaS) gehen große Veränderungen und Risiken für die Anbieter einher, die bisher meist nur als Produzenten aktiv sind und kaum Service anbieten. Mehrkosten entstehen z.B. durch mehr Kundenservice oder neue Infrastruktur, die für die Reverse Logistics nötig wird. Da durch Abo-Modelle teurere Produkte für den Kunden leichter zu finanzieren sind, sollen die Chancen hinter den neuen Geschäftsmodellen gesehen und mit den Risiken abgewogen werden. [Lac-2020, S. 26]

Bei der Umsetzung von CE sind Alltagsbeispiele wie Carsharing, die Rückgabe von Pfandgefäßen oder die Bestrebungen zur Vermeidung von Plastikverpackung präsent. Dabei besteht

beispielsweise bei Carsharing die Gefahr, dass die Fahrleistung insgesamt steigt, da durch den leichten Zugang mehr Menschen das Angebot nutzen [Pot-2016, S. 14]. Gleichzeitig besteht das Risiko des Rebound-Effekts, dass durch Mehrnutzung die Autos auch kürzere Lebensdauern haben [Bra-2021, S. 15]. Die Pfandgefäßrückgabe ist bereits etabliert und viel weniger komplex als die EoL-Prozesse z.B. bei einem NFZ, weshalb eine Übertragung nur schwer möglich ist [Tam-2019]. Die Kunststoffreduktion ist in fast allen Branchen ein wichtiger Hebel. Hier soll jedoch möglichst die absolute Menge reduziert werden, da der Ersatz durch Biokunststoffe nur eine nachhaltige Alternative darstellt, wenn das Material möglichst aus Abfall gewonnen und nach dem Einsatz klassischer Recyclingverfahren wieder von der Natur aufgenommen werden kann [Lac-2020, S. 58]. Das Risiko für Nebeneffekte soll folglich immer mitbetrachtet werden und auch weit verbreitete Maßnahmen sind nicht das ideale Vorbild.

Speziell für die Automobilindustrie ist der hohe Aufwand zur Trennung und Rückgewinnung von verwendeten, kritischen Materialien wie Seltenen Erden eine Herausforderung. Daneben wird der direkte Wiedereinsatz von Stahl, Kupfer oder Kunststoff im gleichen Produkt technologisch erschwert, da das Recycling dieser Materialien oft ein Downcycling bedeutet und die Qualitätsanforderungen den Einsatz der Rezyklate nicht zulassen. Zusätzlich wird durch den Export von Altfahrzeugen der mögliche Kreislauf gestört. [Bra-2021, S. 15ff]

2.3 Kreislaufwirtschaft in der Praxis

Der Weg zur CE fordert einen ganzheitlichen Wandel. Durch einzelne Leuchtturmprojekte wird der notwendige Transformationsprozess nicht angestoßen [BCG-2020, S. 6]. Welche CE-Strategien den größten Erfolg haben können, unterscheidet sich je nach Sektor und Unternehmen. Die CE-Strategien und -Maßnahmen können aus den in Kapitel 2.2.2 vorgestellten, allgemeinen Frameworks abgeleitet bzw. ihnen zugeordnet werden. Nicht alle theoretischen CE-Maßnahmen haben auch das Potenzial, Umweltwirkungen zu verringern und die Ressourceneffizienz zu steigern [Bra-2021, S. 10]. CE-Geschäftsmodelle lassen sich meist nur etablieren, wenn diese wirtschaftlich sind, Einnahmen steigern und Kosten senken, oder regulatorisch vorgeschrieben sind [Nor-2021, S. 43].

Welche CE-Maßnahmen sich auf welche Art in der Praxis umsetzen lassen, wird in diesem Kapitel betrachtet. Die Beispiele aus den verschiedenen Industrien wie der Automobilbranche und dem Maschinen- und Anlagenbau werden entlang der Wertschöpfungskette (vgl. Abbildung 2-8) dargestellt. Als Investitionsgüter haben NFZ Gemeinsamkeiten zu anderen Investitionsgütern wie Werkzeugmaschinen [Ren-2021, S. 1ff]. Zu beachten ist, dass einzelne Maßnahmen nicht ausreichen, um in einem Unternehmen die Transformation zur CE erfolgreich anzugehen. Die als Beispiele genannten Unternehmen setzen einen CE-Ansatz gut um, können aber keineswegs als ideale Vorbilder für CE gesehen werden.

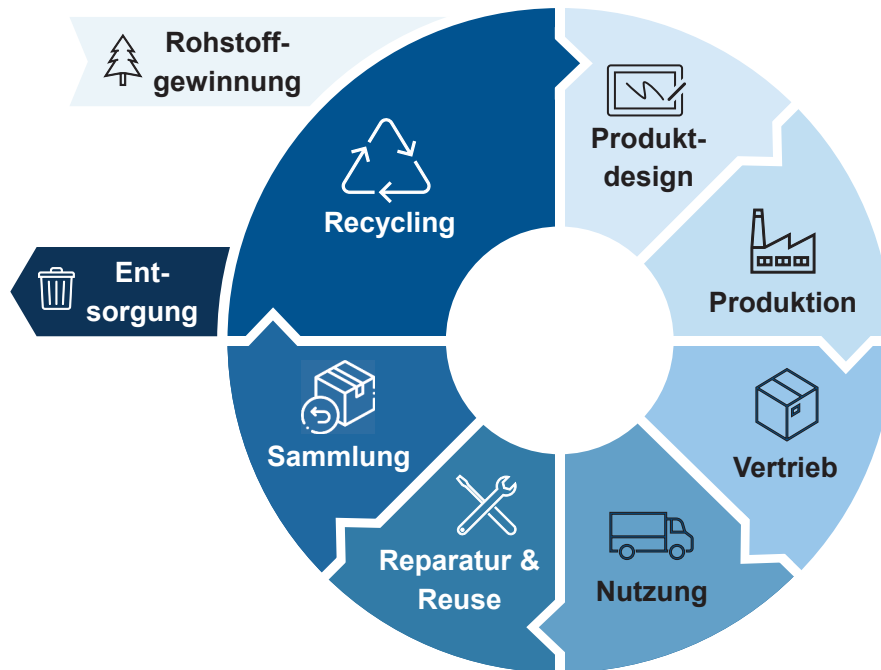


Abbildung 2-8: Wertschöpfungskette in der Kreislaufwirtschaft (eigene Darstellung nach [Fre-2023])

2.3.1 Rohstoffgewinnung

Die CE adressiert die Ineffizienzen durch nicht nachhaltige, direkte und indirekte Materialien [Nor-2021, S. 35]. Verwendete Materialien sollen recycelbar oder recycelt sein, z.B. durch den Einsatz von Kunststoff-Rezyklat oder nachwachsenden bzw. biobasierten Rohstoffen [Bra-2021, S. 31]. Der Einsatz von Aluminium-Rezyklat ist bereits weit verbreitet [Bra-2021, S. 28]. Indirekter Bedarf wie der Energiebedarf soll aus erneuerbaren Energiequellen gedeckt werden [Nor-2021, S. 35]. Um festzustellen, wie nachhaltig Rohmaterialien sind, muss die gesamte, komplexe Lieferkette betrachtet werden. Das Unternehmen Circular hat für Volvo Cars eine Lösung für die Nachverfolgung der in Batterien enthaltenen Materialien entwickelt, die die Transparenz über die Materialeigenschaften erhöhen soll [Eur-2019b].

Im Maschinen- und Anlagenbau wird mit dem prognostizierten Wachstum auch ein erhöhter Materialverbrauch z.B. von Eisenerz einhergehen. Dadurch steigt das Risiko einer zu geringen Verfügbarkeit von neuem Rohmaterial, weshalb CE-Maßnahmen in der Industrie nötig werden, die den Anteil an Sekundärmaterial erhöhen [Lac-2020, S. 129]. Im Automobilsektor wird der Einsatz von Rezyklat oder auch nachwachsenden Rohstoffen aktuell durch hohe Sicherheits- und Qualitätsanforderungen begrenzt [Bra-2021, S. 18ff]. Neue PKW sind bisher nur zu 20-30 % aus Sekundärmaterialien [Ren-2022b].

Um alternative, recycelbare Materialien beschaffen zu können, müssen die benötigten Materialeigenschaften bekannt sein. Partnerschaften mit den Zulieferern können helfen, diese einzubinden, ein Ökosystem aufzubauen und CE-Ansätze in der gesamten Wertschöpfungskette umzusetzen. Es sollen möglichst keine gefährlichen oder giftigen Substanzen in der

Produktion und im Produkt verwendet werden. Akzonobel konnte beispielsweise Lösungsmittel beim Beschichten vermeiden, indem eine Beschichtung aus recyceltem Kunststoff und pflanzlichen Ölen genutzt wird, wie [Nor-2021] als Beispiel nennt. [Nor-2021, S. 59, S. 64]

2.3.2 Produktdesign

Das Produktdesign, die Nutzung des Produkts, mögliche Wiederverwendung und das End-of-Life (EoL) eines Produkts sind eng miteinander verbunden und beeinflussen sich gegenseitig. Die ganzheitliche Betrachtung ermöglicht es, zirkuläre Produkte zu schaffen, statt Produkte, deren Eigenschaften nur einzelne CE-Anforderungen erfüllen. [Lac-2020, S. 234ff]

Zur Verbesserung der CE in der Produktionsphase sollen Produkte so gestaltet sein, dass diese mit geringem Ressourcenaufwand und wenig Abfällen zu produzieren sind [Nor-2021, S. 59]. Außerdem sollen wenige und nachhaltige Ressourcen für die Verpackung aufgewendet werden [Lac-2020, S. 33].

Um eine möglichst lange erste Nutzungsphase zu erreichen, sollen Produkte in einer CE möglichst robust und langlebig gestaltet werden [Cir-2022, S. 31]. Das Design kann zu Ineffizienzen in der Nutzungsphase führen, wenn die Lebensdauer von Produkten durch geringe Reparatur- und Aufrüstungsmöglichkeiten sowie fehlende Modularität begrenzt wird [Nor-2021, S. 35]. Indem gleiche Teile in verschiedenen Produkten eingebaut werden, standardisierte Schnittstellen vorgesehen sind und der grundlegende Aufbau ähnlich ist oder auf einer gemeinsamen Plattform basiert, können Teile und Materialien leichter weiterverwendet werden. Gleichzeitig können die Produktionskosten gesenkt werden. Als Beispiele nennt [Nor-2021] das modulare Motordesign der Firma Wärtsilä und der Firma Agco Power [Nor-2021, S. 60, S. 157].

Demontagegerechte Konstruktion erleichtert die Prozesse am EoL und damit auch die CE-Ansätze Repair, Refurbish, Remanufacture und Repurpose (vgl. 9R-Modell in Kapitel 2.2.2) [Nor-2021, S. 59]. Um Remanufacturing von Komponenten zu ermöglichen, gibt Caterpillar an, den Designprozess zirkulär organisiert zu haben. Die Gestaltung von Neuteilen, des Remanufacturing Prozesses und der aufbereiteten Teile unterscheidet sich dadurch vom Konstruktionsprozess in einer linearen Wertschöpfungskette [Cat-2022a].

Auch die Recyclingfähigkeit eines Produkts wird durch die Materialauswahl und das Produktdesign beeinflusst [DIN-2023, S. 181]. Bei der Gestaltung sollen möglichst wenig verschiedene, möglichst reine und recycelbare Materialien verwendet und leicht von einander trennbar angeordnet werden [Nor-2021, S. 173]. Mit der CE-Aktivität RE:THINK setzt BMW hier an und hat beispielsweise im Rahmen des BMW i Vision Circular ein Sitzkonzept entwickelt, das nur aus wenigen, rezyklierten Materialien besteht, sich gut demontieren lässt und die Materialien einfach sortenrein getrennt werden können [Sei-2022, S. 85].

Leichtbau in der Konstruktion reduziert den Materialbedarf [Bra-2021, S. 28]. Unabhängig von der Antriebstechnologie senkt eine Gewichtsreduktion des Fahrzeugs auch den Verbrauch, was zu wirtschaftlichen Einsparungen führt und je nach Einsatz die Transportkapazität erhöht [Dep-2013, S. 20]. Durch autonomes Fahren kann der Materialbedarf aufgrund erhöhter Fahrsicherheit und der dadurch möglichen Verkleinerung der Crashzonen reduziert werden [Cir-2022, S. 31].

Für neue Geschäftsmodelle wie Sharing oder PaaS soll das Design entsprechend angepasst werden [Lac-2020, S. 130]. Beispielsweise können die Maschinen mit intelligenten Sensoren ausgestattet werden. Die Firma Michelin treibt digitale Lösungen voran und nutzt verschiedene Sensoren, um mithilfe der Daten die Leistung der Fahrzeuge zu steigern [Lac-2020, S. 134]. Der Einsatz von Telematik kann das Fahrverhalten und die Kundenbeziehung verbessern, ermöglicht Predictive Maintenance und kann zu Energie- und Materialeinsparungen führen [Lac-2020, S. 155; Sai-2018, S. 38f].

2.3.3 Produktion

Um CE im Produktionsbetrieb voranzutreiben, sind Maßnahmen zur Reduzierung des Energie- und Wasserverbrauchs, der Emissionen und der Müllproduktion durch linearen Ressourcenverbrauch umzusetzen [Lac-2020, S. 216]. Oft sind diese Maßnahmen der erste Schritt in Richtung CE im Unternehmen, da die Optimierung der internen Produktionsprozesse naheliegend und die Kosteneinsparungen kurzfristig sichtbar sind [Lac-2020, S. 215]. CE-Maßnahmen wie die Vermeidung und das Recycling von Produktionsabfällen sind deshalb in den meisten Industrieunternehmen bereits etabliert [Bra-2021, S. 28]. Wichtig ist, dabei zwischen Nachhaltigkeitsmaßnahmen zur Verringerung von Abfällen und CE-Maßnahmen mit dem Ziel, Abfälle komplett zu vermeiden, zu unterscheiden [Lac-2020, S. 220].

Die Produktionsverfahren hängen vom Produktdesign ab und sollen möglichst nachhaltig sein. Ein Beispiel ist die Verwendung von 3D-Druck für Einzelteile oder Werkzeuge, wenn durch andere Verfahren viele Produktionsabfälle entstehen [Nor-2021, S. 59]. Der Materialbedarf und die Materialkosten können durch 3D-Druck in bestimmten Fällen um bis zu 90 % reduziert werden [Lac-2020, S. 155]. Da die Fertigungsverfahren z.B im Maschinen- und Anlagenbau sehr ressourcenintensiv sind, haben Maßnahmen zur Reduktion der Emissionen und des Materialverbrauchs in der Produktion großen Einfluss auf die Verschwendung von Ressourcen und die Umweltwirkung des Produkts [Lac-2020, S. 129ff].

2.3.4 Vertrieb

Durch nachhaltiges Produktdesign ausgerichtet auf CE mit dem Fokus auf die Kundenbedürfnisse ergeben sich verschiedene Vertriebsmöglichkeiten entlang der Wertschöpfungskette.

Die Kundenzentrierung wird verbessert, neue Kundeninteraktionsmöglichkeiten werden genutzt, Produkte können gemeinsam mit dem Kunden entwickelt werden und statt dem Verkauf und Besitz von Produkten werden die komplette Lösung und Dienstleistungen angeboten [Nor-2021, S. 26, S. 53]. Mögliche PaaS-Modelle sind die kurzzeitige Vermietung, das klassische Leasing, Leasing inklusive Dienstleistungen wie Wartung oder Leasing kombiniert mit nutzungsabhängigen Gebühren [Nor-2021, S. 62]. Je nach Modell wird die CE der Produkte gefördert, weil langlebige, gut reparierbare und wartbare Produkte sich besser für PaaS-Modelle eignen.

In der Automobilindustrie sind PaaS-Angebote für ganze Fahrzeuge oder die Batterien möglich. Anbieter behalten den Überblick über die Fahrzeuge, können die Nutzung rückverfolgen und sie am Lebensende leichter in den Kreislauf zurückführen. Aufgrund der veränderten Besitzverhältnisse ist sicherzustellen, dass weiterhin verantwortungsvoll mit dem Produkt umgegangen wird, damit ein höherer Verschleiß nicht zu einer kürzeren Lebensdauer führt. [Bra-2021, S. 23]

Ein Beispiel aus der Schifffahrt ist das Modell „Power by the hour“ von Kongsberg, bei dem die Schiffe nicht klassisch gekauft werden, sondern in einem PaaS-Modell mit Pay-per-Use jede Betriebsstunde bezahlt wird. Das ermöglicht die flexible Nutzung und dauerhafte Verfügbarkeit der Schiffe, da diese von Kongsberg digital überwacht und gewartet werden. Je langlebiger die Schiffe gestaltet sind, je länger sie im Einsatz sind und je weniger Wartung nötig ist, desto wirtschaftlicher ist die Lösung für Kongsberg. [Nor-2021, S. 28]

Sharing-Modelle wie z.B. Carsharing von Share Now ermöglichen als indirekte CE-Maßnahme eine effizientere Nutzung der Produkte [Bra-2021, S. 23]. Einen direkten, positiven Einfluss auf die CE haben Carsharing-Modelle aber nur, wenn sich dadurch die Gesamtanzahl an PKW verringert [Lac-2020, S. 150]. Besonders sinnvoll sind Sharing-Angebote bei wertvollen Produkten, die eine geringe Auslastung haben [Lac-2020, S. 24].

Bleibt es beim Besitz des Produkts, sind in einer CE am EoL die Möglichkeiten des Weiterverkaufs zu definieren. Für Reuse, Refurbish oder Remanufacturing sind zusätzliche Infrastruktur und angepasste Angebote, Vertriebsansätze und -kanäle für den Wiederverkauf nötig [Nor-2021, S. 53].

2.3.5 Nutzung

Effizienzsteigerungen in der Nutzungsphase sind möglich, indem der Nutzungsgrad der Produkte z.B. durch neue Geschäftsmodelle wie PaaS-Modelle oder Sharing-Modelle erhöht wird [Lac-2020, S. 25]. Im Maschinen- und Anlagenbau liegt CE-Potenzial in der intensiveren Nutzung der Maschinen, da aktuell die Leerlaufzeit bis zu 60 % der Laufzeit ausmacht [Lac-2020, S. 129].

Eine weitere CE-Maßnahme ist, die Ressourceneffizienz in der Nutzungsphase zu steigern. Der Einsatz der Betriebsmittel soll möglichst wenige Ressourcen verbrauchen [Nor-2021, S. 59]. Bei Fahrzeugen können durch den Einsatz von Telematik, besonders kraftstoffsparendes Fahren oder autonomes Fahren der Ressourcenverbrauch und die Emissionen verringert werden [Lac-2020, S. 155]. Maßnahmen wie eine schonende Ladestrategie der Antriebsbatterie wirken sich ebenfalls auf die Ressourceneffizienz aus [Bra-2021, S. 23]. Durch eine Verringerung des Transport- und Reiseaufkommens insgesamt könnten weitere Emissionen im Mobilitätssektor eingespart werden [Cir-2022, S. 31].

2.3.6 Reparatur und Wiederverwendung

Ist ein Produkt defekt oder wird es aufgrund der individuellen Anforderungen des Besitzers entsorgt, muss es damit nicht das EoL erreicht haben. Funktionierende Produkte können auf dem Gebrauchtmärkte weiterverkauft und mit gleichem oder verändertem Zweck eingesetzt werden. Durch verbesserte Wartung und Reparatur können Ausfälle vermieden bzw. behoben und die Produkte dadurch länger und effizienter genutzt werden [Bra-2021, S. 23]. Beispielsweise bietet das Unternehmen Konecranes ein Lifecycle Care-Programm an, das Beratung, Modernisierung und Wartungsangebote umfasst [Nor-2021, S. 26]. Das Unternehmen ABB bietet zustandsbezogene Wartung an und verbessert damit die Verlässlichkeit und Verfügbarkeit der Produkte, indem Ausfälle vorausgesagt werden und die entsprechende Reparatur angeleitet wird [Nor-2021, S. 160]. Auch neben den eigentlichen Endprodukten lassen sich CE-Maßnahmen umsetzen, wie das Unternehmen Dräxlmaier beim Behältermanagement zeigt. Die Behälter sind standardisiert, aus möglichst nachhaltigen Materialien, werden in einem geschlossenen Kreislauf immer wieder eingesetzt und am Lebensende recycelt [Sti-2021, S. 80].

2.3.7 Sammlung

Können Produkte nicht direkt wiederverwendet oder repariert werden, sind Remanufacturing oder Recycling die alternativen Wege, um die Produkte im Kreislauf zu behalten (vgl. Butterfly-Diagramm im Kapitel 2.2.2). Demontage, Recycling oder Aufbereitung von Produkten am EoL sind nur möglich, wenn die Produkte erfasst und gesammelt werden können. Für die Reverse Logistics braucht es ein funktionierendes Rückgabesystem und möglichst zusätzliche Anreize für die Rückgabe [Nor-2021, S. 64]. Wirtschaftliche und ökologische Vorteile vom Remanufacturing und damit Anreize sind z.B. potenzielle Kosteneinsparungen für den Hersteller und Kunden, bessere Kundenbindung sowie Material-, Energie- und Emissionseinsparungen im Vergleich zum Neuteil [Sai-2018, S. 139]. Ein Beispiel für einen finanziellen Anreiz für den Kunden ist eine Gutschrift, die das Unternehmen Ponsse dem Kunden bei gleichzeitiger Rückgabe eines Teils und Kauf eines Teils aus dem Remanufacturing bietet [Nor-2021, S. 150].

Im ersten Schritt sollen die gesammelten Produkte im System als Rückgabe erfasst und die Qualität kontrolliert werden, wobei digitale Technologien wie KI helfen können [Nor-2021, S. 68]. Im Optimalfall werden die Nutzung und Qualität der Produkte über den gesamten Lebensweg verfolgt und sind damit bekannt, um die passenden EoL-Maßnahmen zu wählen [Nor-2021, S. 70]. Je nach Zustand, Materialbedarf und Kostenaufwand soll dann nach festen Regeln entschieden werden, ob für die Produkte die CE-Maßnahmen Refurbish, Remanufacture, Repurpose oder direkt Recycling am geeignetsten sind (vgl. 9R-Modell im Kapitel 2.2.2) [Sai-2018, S. 140]. Nach der Aufbereitung soll in einem weiteren Schritt die Qualität geprüft werden, da z.B. durch Remanufacturing die OEM-Qualität wiederhergestellt werden soll [Nor-2021, S. 68].

Im Maschinen- und Anlagenbau haben die Maschinen Lebensdauern von bis zu 30 Jahren und werden regelmäßig gewartet, weshalb Reparaturen und Remanufacturing sowie die nötige Reverse Logistics Infrastruktur oft bereits etabliert sind [Lac-2020, S. 129ff]. Der Kundendienst macht einen wichtigen Teil der Wertschöpfung aus. Als Best Practice nennt [Lac-2020] das Unternehmen Volvo Construction, das verschiedene Pakete für die Aufbereitung von Maschinen anbietet. Der Kunde kann die Maschine mit den Zielen zurückgeben, dass der Verbrauch gesenkt wird, die Hydraulik und die Produktivität verbessert oder die Maschine komplett auf einen Zustand wie neu gebracht wird [Lac-2020, S. 133]. Das Unternehmen Caterpillar nutzt eine Art Pfandsystem für die Rückgabe, erfasst alle Teile, hat weltweite Remanufacturing-Zentren und erhält 88 % der geeigneten Teile zurück [Sai-2018, S. 42; Cat-2022b]. In Abbildung 2-9 sind der Lebensweg eines Produkts und die Schritte beim Remanufacturing dargestellt, wie sie bei Caterpillar durchgeführt werden [Cat-2022b; Cat-2023].

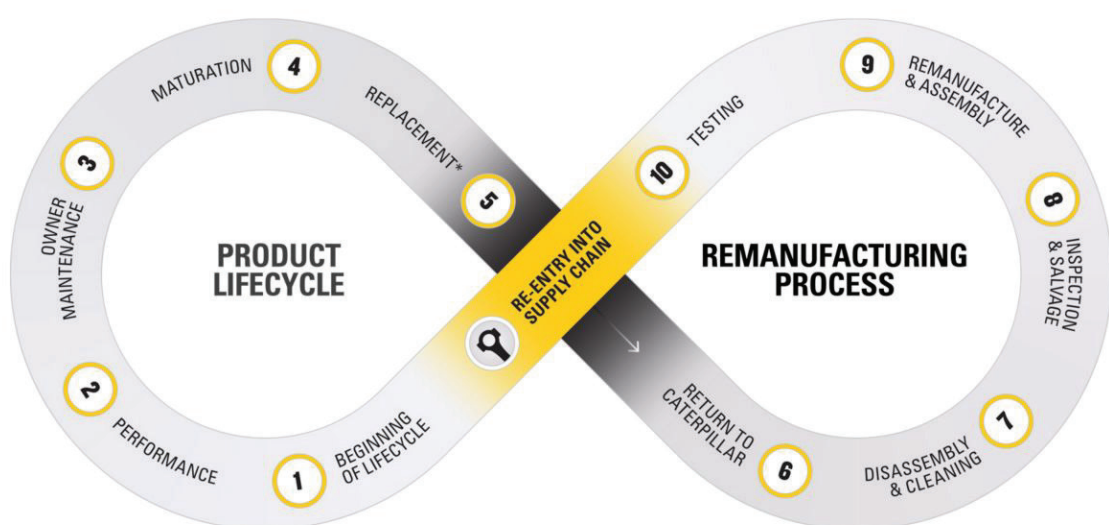


Abbildung 2-9: Produktlebensweg und Prozessschritte beim Remanufacturing bei Caterpillar [Cat-2023]

Bei PKW und leichten NFZ ist Remanufacturing oft nicht profitabel genug. Umsatz wird mit dem Verkauf demontierter Ersatzteile gemacht, bevor das restliche Fahrzeuge im nächsten Schritt recycelt wird. Durch die existierende ELV-Richtlinie sind die Schritte am EoL von PKW gut organisiert und kontrolliert. Die zusätzlichen Kosten für die EoL-Prozesse werden durch die Einnahmen beim Verkauf der Gebrauchtteile gedeckt. Trotz der gesetzlichen Vorgaben gibt es weiterhin illegale Recycler und illegalen Export von Fahrzeugen am EoL. [Sai-2018, S. 34]

Das Joint Venture Encory von den Unternehmen Interzero und der BMW Gruppe ist speziell auf die Reverse Logistics von PKW ausgerichtet. Es werden individuelle Strategien für den Kundenservice entwickelt, Reverse Logistics Management und IT-Lösungen zur Organisation und Überwachung der EoL-Lieferketten angeboten. Sobald ein Teil in einer Werkstatt ausgebaut wird, setzen die Angebote von Encory an und die Logistik, Sortierung und Identifikation wird durch qualifizierte Unternehmen übernommen. [Sti-2021, S. 84f]

Die Renault Gruppe ist in der Automobilbranche Vorreiter in Richtung CE. Mit Start in 2021 hat Renault ihre Produktionsanlage in Flins zur Refactory umgebaut, die erste Fabrik dieser Art im Mobilitätssektor in Europa [Ren-2020]. 2022 hat Renault zusätzlich die neue Einheit „The Future is NEUTRAL“ gegründet, die über die Grenzen der Renault Gruppe hinaus die CE in der Automobilindustrie vorantreiben soll [Ren-2022b]. In der Refactory findet die Aufbereitung von Fahrzeugen aller Marken und Typen und Remanufacturing von Fahrzeugkomponenten statt. Beim Remanufacturing der verschiedenen Teile kann 85 % der Energie und 96 % des Wassers eingespart werden und die Teile werden im Durchschnitt 40 % günstiger. Gebrauchtteile in gutem Zustand aus den Fahrzeugen am EoL werden an Händler verkauft und damit wiederverwendet. [Ren-2022a]

Neben den produktbezogenen Maßnahmen arbeitet die Refactory mit einer Vielzahl an Partnern zusammen und schafft ein Ökosystem. Im Inkubator des Open Innovation Hub wurden 2022 bereits erste Startups gefördert, wobei aus der Zusammenarbeit auch Projekte in der Refactory umgesetzt werden konnten. Ein Innovationszentrum wurde geschaffen, in dem z.B. industrieller 3D-Druck vorangetrieben, Produktionsprozesse optimiert und LKW-Prototypen gebaut werden. Ein neuer Campus für CE im Mobilitätssektor hat das Ziel Forschung zu fördern, Wissen zu teilen und Studierende und Fachkräfte weiterzubilden. Damit wurden in der Refactory eine Vielzahl an CE-Ansätzen kombiniert. Ein weiterer Bereich der Refactory beschäftigt sich mit alternativen Antrieben, der Reparatur von Antriebsbatterien, dem Wiedereinsatz und Upcycling zum stationären Energiespeicher, dem Einsatz von Wasserstoff, dem Bau von Brennstoffzellen und der entsprechenden Ladeinfrastruktur. [Ren-2022a]

Auch Volkswagen (VW) hat Maßnahmen über den gesamten Lebensweg der Batterie definiert, die die Reparatur, das Remanufacturing und das Repurposing der Batterie gemeinsam mit Partnern umfassen. Zudem wird an der Materialzusammensetzung geforscht, um den

Anteil kritischer Materialien zu verringern. Für das Recycling der Batterien hat VW eine eigene Anlage in Salzgitter gebaut und versucht die Recyclingrate zu maximieren. [Sti-2021, S. 93ff]

2.3.8 Recycling

Lässt sich die Nutzungsdauer eines Produkts nicht mehr verlängern, sind Abfälle angefallen oder können einzelne Komponenten z.B. aufgrund von Abnutzung, Alterung oder Sicherheitsanforderungen nicht mehr weiterverwendet werden, sollen die Materialien durch Recycling zurückgewonnen werden. Es gibt zwei verschiedene Modelle, wie die recycelten Materialien weiterverwendet werden können. In einem geschlossenen Kreislauf wird der Abfall recycelt und soweit möglich wieder für dasselbe Produkt genutzt. In einem offenen Kreislauf können auch andere Industrien den Abfall als Rohstoff weiterverwenden. Es muss jedoch dafür gesorgt werden, dass im offenen System die Rohstoffe nicht schrittweise weniger Wert werden, sondern der Kreislauf insgesamt geschlossen ist. [Lac-2020, S. 235]

Im Automobilsektor sind das Recycling von Kunststoffen, kritischen Materialien und der Antriebsbatterie potenzielle CE-Maßnahmen [Bra-2021, S. 18f]. Das Recycling von Produktionsabfällen wie z.B. Stahl und das Recycling von Aluminium werden bereits durch viele Unternehmen eingesetzt und bergen damit nur noch wenig Entwicklungspotenzial [Bra-2021, S. 17]. Im Optimalfall kann das gesamte Fahrzeug recycelt werden [Cir-2023, S. 32]. Oft stehen sich jedoch hohe Qualitäts- und Sicherheitsanforderungen an die Komponenten der Fahrzeuge und Downcycling beim Recycling gegenüber, weshalb die aktuell zurückgewonnenen Sekundärmaterialien oft die Anforderungen für Neuprodukte nicht erfüllen können [Bra-2021, S. 15]. Renault verfolgt mit der Refactory und der Gründung der neuen Einheit „The Future is NEUTRAL“ das Ziel des geschlossenen Kreislaufs in der Automobilindustrie und der CO₂-Neutralität [Ren-2022b]. Fahrzeugteile, die sich nicht weiterverwenden lassen, kommen zu spezialisierten Recyclern und zurückgewonnene Kunststoffe, Kupfer und Edelmetalle werden als Sekundärmaterial wieder bei Renault eingesetzt [Ren-2022a].

Die Reinheit der Materialien und das Wissen über die Zusammensetzung haben einen entscheidenden Einfluss auf das Recycling [Bra-2021, S. 15]. In der Schifffahrt hat das Unternehmen Maersk beispielsweise einen Cradle-to-Cradle-Passport eingeführt, in dem die Materialzusammensetzung der Komponenten erfasst werden, um die Schiffe besser recyceln zu können und den Restwert zurückzugewinnen [Nor-2021, S. 60].

2.3.9 Entsorgung

Ziel der CE ist es, die Kreisläufe zu schließen. Die Entsorgung von als Abfall angefallenen Produkten, Komponenten oder Materialien muss dafür möglichst vollständig vermieden werden. In der Abfallwirtschaft wird entlang der Abfallpyramide hierarchisch zwischen fünf

verschiedenen Aktivitäten unterschieden. Die höchste Priorität hat die Abfallvermeidung, dann folgt die Vorbereitung zur Wiederverwendung, die stoffliche Verwertung beim Recycling, sonstige Verwertung wie die energetische Verwertung beim Verbrennen und die geringste Priorität hat die Beseitigung (vgl. Abbildung 2-10) [BMU-2023a]. Diese Reihenfolge wird auch im Kreislaufwirtschaftsgesetz betrachtet. Seit der Erneuerung des Gesetzes durch die Forderungen der neuen EU-Abfallrahmenrichtlinie stehen Recycling und Vermeidung noch stärker im Fokus [BMU-2023b].

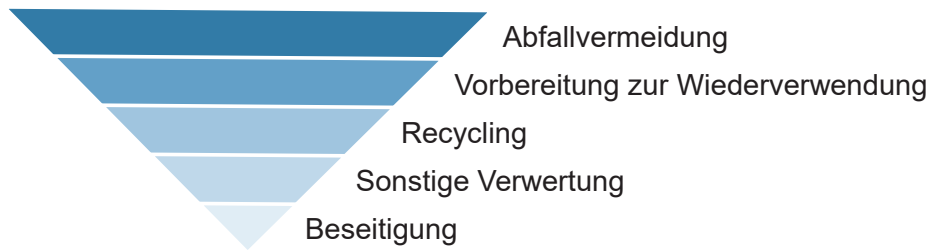


Abbildung 2-10: Abfallpyramide (eigene Darstellung nach [BMU-2023a])

3 Methodik

Ziel dieser Arbeit ist es, die aktuellen Entwicklungen der CE im NFZ-Sektor zu identifizieren. Dafür wurden eine Ist-Analyse der Industrie durchgeführt und aktuelle CE-Maßnahmen, Treiber, Potenziale und Hemmnisse identifiziert. Die Inhalte dieser Arbeit wurden in zwei Schritten, durch eine Theorieanalyse und eine Praxisanalyse, erarbeitet [vgl. Sti-2021, S. 15].

Ausgangspunkt der Theorieanalyse durch Literaturrecherche waren grundlegende Informationen zu Nachhaltigkeit und CE. Darauf aufbauend wurden aktuelle Studien gesichtet und CE-Beispiele aus verschiedenen Industrien gesammelt. Parallel wurden Informationen zum NFZ-Sektor allgemein und aktuellen Trends im Sektor recherchiert. Die Ergebnisse sind im vorherigen Kapitel 2 zusammengefasst und strukturiert dargestellt. Die Recherche beschränkt sich bei den NFZ auf Busse und LKW sowie geographisch auf Europa bzw. Deutschland. Im folgenden Kapitel 4 werden die Rechercheergebnisse mit spezifischer Literatur zur CE im NFZ-Sektor zusammengeführt. Für die Praxisanalyse wurden Experteninterviews durchgeführt, um einen aktuellen Einblick in die Industrie zu erhalten. Die Anzahl an wissenschaftlichen Veröffentlichungen zum Thema ist begrenzt, weshalb die Erkenntnisse aus den Experteninterviews den Kern der Ist-Analyse ausmachen.

3.1 Literaturrecherche

Für die Literaturrecherche wurden neben wissenschaftlichen Büchern und Artikeln auch öffentliche und privatwirtschaftliche Studien, statistische Datenbanken, Gesetzestexte und Internetquellen herangezogen [San-2017, S. 67f]. Es wurde sowohl systematisch recherchiert, als auch nach dem Schneeballsystem vorgegangen [San-2017, S. 71]. Für die Recherche von wissenschaftlicher Literatur wurden Datenbanken wie Scopus, SpringerLink, ScienceDirect, ResearchGate und der Online Public Access Catalogue (OPAC) der Technischen Universität München verwendet. Schlagworte wurden sowohl auf Deutsch als auch auf Englisch genutzt z.B. LKW, Nutzfahrzeuge, Kreislaufwirtschaft, commercial vehicles, heavy-duty, trucks, circular, circular economy, lifecycle, remanufacturing, disassembly, return, end-of-life. Zusätzlich wurde nach konkreten Informationen z.B. zum Angebot der OEM oder aktuellen Daten zum Export von NFZ und nach unterstützender Literatur für Aussagen der Experten gesucht.

3.2 Experteninterviews

Um einen Einblick in die Praxis zu erhalten, wurden Experteninterviews durchgeführt. Experteninterviews sind qualitative Interviews und damit semistrukturierte Datenerhebungsverfahren. Mithilfe eines Leitfadens werden das Interview durch den Interviewer strukturiert, alle relevanten Themen aufgelistet und die erhobenen Daten besser vergleichbar. Die Fragen sollen möglichst offen formuliert und verständlich sein. Die Reihenfolge der Fragen soll an den Verlauf des Gesprächs angepasst werden, wodurch sich das Interview möglichst einem Alltagsgespräch annähern soll. Der Leitfaden soll das Interview in Informations- und Einstiegsphase, Hauptphase und Abschlussphase strukturieren. [Mis-2015, S. 65ff]

Bei einem Experteninterview werden Personen interviewt, die über spezielles Wissen in einem bestimmten Themengebiet über das Alltagswissen hinaus verfügen. Die Experten werden im Interview weniger als individuelle Person und mehr als Wissensträger befragt, weshalb ihre subjektiven Wahrnehmungen eher im Hintergrund stehen. Es kann entweder Kontextwissen, explizites Wissen zum Handeln anderer, oder Betriebswissen, explizites und implizites Wissen zum Handeln des Experten selbst, erhoben werden. [Mis-2015, S. 120ff]

Für die Durchführung von Experteninterviews soll im ersten Schritt festgelegt werden, welches Ziel die Interviews haben, mit welchen Experten dafür gesprochen werden soll und wie diese erreicht werden. Im zweiten Schritt soll ein Leitfaden als Basis und Struktur für die Interviewdurchführung erarbeitet werden. Während der Interviews sollen die Inhalte beispielsweise durch Audioaufnahmen oder Mitschriften erfasst werden. Nach der Durchführung folgt die Auswertung der Daten meist durch Transkribierung, Kodierung, Vergleich und Typologisierung. [Mis-2015, S. 124f]

3.2.1 Experten

Ziel dieser Arbeit ist, aktuelle Entwicklungen der CE im NFZ-Sektor zu erfassen und durch die Interviews einen praktischen Einblick in die Situation der OEM von NFZ zu erhalten. Insgesamt wurden 12 Experten interviewt. Eine anonymisierte Auflistung aller Interviewpartner findet sich im Anhang A. 10 Experten arbeiten bei europäischen NFZ-OEM in verschiedenen Positionen, die eine Rolle bei der Umsetzung der CE spielen (vgl. Anhang A E2, E3, E5, E6, E7, E8, E9, E10, E11, E12). Nicht alle Experten haben sich in der Vergangenheit intensiv mit CE auseinandergesetzt, sondern besitzen spezifisches Wissen in ihrem jeweiligen, CE-relevanten Tätigkeitsbereich und wurden zu ihrem Betriebswissen befragt. Um die Übertragbarkeit der einzelnen Aussagen auf den NFZ-Sektor sicherzustellen, wurden Experten von verschiedenen OEM befragt. Daneben wurden zwei weitere Experten und Berater für CE zu ihrem Kontextwissen über CE im NFZ-Sektor befragt (vgl. Anhang A E1, E4). Die Interviews waren jeweils etwa 60 Minuten lang.

3.2.2 Interviewleitfaden

Um die Interviews nicht als Laie durchzuführen, wurde der Großteil der Literaturrecherche vor den Experteninterviews durchgeführt. Dadurch war der Stand der Wissenschaft und Technik bekannt und fachspezifische Aussagen der Interviewpartner verständlich. Als Struktur für die Interviews wurde auf Basis der Recherche ein Interviewleitfaden entwickelt (vgl. Anhang B). Der Leitfaden deckt alle relevanten Themen ab, die in den Interviews untersucht werden sollten. Für alle Interviews wurde der gleiche Fragebogen als Grundlage genutzt, um eine Vergleichbarkeit der Aussagen zu erreichen. Da der Fragebogen möglichst die gesamte Breite an relevanten Themen abdecken soll, enthält er mehr Fragen, als in der Zeit eines Interviews gestellt werden können. Je nach Expertise der Interviewpartner und Gesprächsverlauf wurde der Leitfaden angepasst, bestimmte Fragen priorisiert und stärker im Detail nachgefragt.

Der Leitfaden setzt sich aus den folgenden Abschnitten zusammen (vgl. Anhang B für den vollständigen Leitfaden):

- 1) Informations- und Einstiegsphase
- 2) Allgemeiner Einstieg in den NFZ-Sektor
- 3) Status Quo der CE im NFZ-Sektor
- 4) Rolle von CE und Nachhaltigkeit im Unternehmen
- 5) Bisherige CE-Aktivitäten im Unternehmen
- 6) Detail einer aktuellen CE-Maßnahme im Unternehmen
- 7) Potenziale und zukünftige CE-Aktivitäten im Unternehmen
- 8) Potenziale im NFZ-Sektor und Best Practices anderer Industrien
- 9) Ausblick für den NFZ-Sektor
- 10) Abschlussphase

3.2.3 Auswertung der Interviews

Alle durchgeführten Interviews wurden aufgezeichnet, wodurch die Gespräche im Nachgang ausgewertet werden konnten. Die Inhalte stichpunktartig erfasst, entlang des Leitfadens thematisch geordnet, verglichen und ausgewertet. Auf vollständige Transkribierung, Kodierung und Typologisierung der Interviews entsprechend des klassischen methodischen Vorgehens bei einer qualitativen Inhaltsanalyse wurde zur Reduzierung des Aufwands der Analyse verzichtet [Mis-2015, S. 124f]. Aufgrund der Audioaufnahmen können die Aussagen der Experten trotzdem auch als Zitat wörtlich wiedergegeben werden.

Für die Erfassung des Status Quo wurden die Interviews mittels SWOT-Analyse ausgewertet (vgl. Abbildung 3-1). Bei einer SWOT-Analyse werden sowohl das interne als auch das externe Umfeld betrachtet, meist als Grundlage für die Strategieentwicklung. SWOT steht für die organisationsinternen Stärken (S - *Strengths*) und Schwächen (W - *Weaknesses*) und

die externen Chancen (O - *Opportunities*) und Risiken (T - *Threats*). In dieser Arbeit wurde SWOT zur Einordnung der aktuellen CE-Entwicklungen bei den OEM und im NFZ-Sektor angewendet. Die internen Faktoren umfassen die einzelnen OEM im NFZ-Sektor, während für die externen Faktoren der gesamte NFZ-Sektor und der Einfluss des weiteren Umfelds betrachtet wurden. [Gür-2017, S. 995f]

	Positiv	Negativ
Intern	S Stärken (<i>Strengths</i>)	W Schwächen (<i>Weaknesses</i>)
Extern	O Chancen (<i>Opportunities</i>)	T Risiken (<i>Threats</i>)

Abbildung 3-1: SWOT-Analyse (eigene Darstellung nach [Gür-2017])

Die Ergebnisse der Analyse wurden in vier Bereiche eingeteilt (vgl. folgendes Kapitel 4). Die Stärken und bisher erfolgreichen CE-Aktivitäten wurden zur Ist-Situation zusammengefasst. Die Informationen zur Ist-Situation wurden wie in Kapitel 2.3 entlang des Lebenswegs der NFZ sortiert. Hier wäre alternativ z.B. eine Sortierung entlang eines CE-Frameworks möglich (vgl. Kapitel 2.2.2). Die identifizierten Schwächen und Risiken wurden zu Hemmnissen zusammengefasst, die extern, intern oder aufgrund der Produkteigenschaften von NFZ auftreten. Die Chancen wurden als Faktoren mit positivem Effekt auf die CE zu Treibern zusammengefasst, die entweder extrinsisch oder intrinsisch motiviert sind. Aus der Einordnung der aktuellen CE-Entwicklungen heraus lassen sich als vierten Schritt Potenziale für die Zukunft ableiten, die die Ist-Situation verbessern, Hemmnisse überwinden können und durch die Treiber motiviert sind. Die Potenziale wurden als Ausblick auf die Zukunft zeitlich bezüglich ihrer Umsetzbarkeit und Dringlichkeit geordnet. Hier wäre alternativ ebenfalls eine Sortierung nach einem CE-Framework (z.B. dem 9R-Modell vgl. Kapitel 2.2.2) oder entlang des Lebenswegs von NFZ möglich.

Bei der Umfeldanalyse z.B. der Identifikation der Treiber soll möglichst das gesamte Umfeld betrachtet werden. Die PESTEL-Methode teilt dafür die Einflussfaktoren in sechs Bereiche ein: Politisch (P), Wirtschaftlich (E), Sozio-kulturell (S), Technologisch (T), Ökologisch (E) und Rechtlich (L) [BMI-2023]. Bei der Auswertung der Interviews wurde darauf geachtet, alle Bereiche zu betrachten.

4 Ist-Analyse der Kreislaufwirtschaft im Nutzfahrzeugsektor

In Kapitel 2 wurde ein allgemeines Verständnis des NFZ-Sektors aufgebaut, das Konzept der CE betrachtet und Beispiele aus anderen Industrien gesammelt. In diesem Kapitel werden die Erkenntnisse verbunden und eine Ist-Analyse der CE im NFZ-Sektor durchgeführt. Das Wissen über die NFZ-Industrie, die Kunden, rechtliche Anforderungen und die Eigenschaften der Fahrzeuge sind neben dem Verständnis der CE eine notwendige Basis für die Ist-Analyse. Die Ergebnisse der Experteninterviews werden mit den Rechercheergebnissen kombiniert und mithilfe des methodischen Rahmens der SWOT-Analyse strukturiert.

Im ersten Abschnitt wird die Ausgangssituation der NFZ-Industrie betrachtet, welche Maßnahmen bereits angegangen werden und wo die Stärken bezüglich CE liegen. Im zweiten Abschnitt wird auf die Schwächen und Risiken eingegangen, die Hemmnisse für den NFZ-Sektor auf dem Weg zur CE darstellen. Der dritte Abschnitt nennt die Treiber für die CE im NFZ-Sektor. Im vierten Abschnitt werden die in der Literatur und den Experteninterviews genannten Potenziale dargestellt. Dies stellt keinen vollständigen Überblick dar, weshalb weitere potenzielle CE-Maßnahmen identifiziert werden können. Die Potenziale lassen sich aus den zukünftigen Plänen der OEM, den Wünschen der Experten und dem Ziel der Überwindung der Hemmnisse ableiten.

4.1 Ist-Situation

Während die Elektrifizierung einer der Haupttrends und gleichzeitig eine der größten Herausforderungen im NFZ-Sektor ist, ist die CE im Sektor bislang weniger betrachtet worden [E1]. Aufgrund der hohen Lebensdauer, Auslastung und Lebensfahrleistung von NFZ hat die Nutzungsphase den größten Einfluss auf den ökologischen Fußabdruck. Die Dekarbonisierung durch Elektrifizierung und der Vermeidung von Kraftstoffverbrennung ist folglich der erste Schritt zur Reduzierung der Umweltauswirkungen [E1]. CE und Dematerialisierung sind der nächstfolgende Schritt und bisher von geringerer Priorität [E1; E3].

Die bisher geringe Relevanz zeigt sich auch in der Literaturrecherche. Bei der Suche nach Nachhaltigkeit im NFZ-Sektor dominiert Literatur zur Elektrifizierung der Fahrzeuge. Arbeiten über NFZ mit Bezug zur CE wie die Promotion [Sai-2018] oder andere Hochschularbeiten wie [Pal-2020] stellen eher Ausnahmen dar. Der Großteil der Suchergebnisse beschäftigt sich mit der CE in der Automobilindustrie, wozu zwar leichte aber keine schweren NFZ gezählt werden.

Die Automobilindustrie ist der NFZ-Industrie bezogen auf die CE bereits einige Jahre im Voraus [E1]. Bei PKW ist der Anteil der Fahrzeugherstellung am ökologischen Fußabdruck größer als bei NFZ, da die Lebensfahrleistungen geringer sind, weshalb auch der Einfluss von Maßnahmen zur Dematerialisierung größer ist [E1]. Richtlinien wie die ELV-Richtlinie gelten seit Jahren und regeln z.B. das Recycling und die Herstellerverantwortung. Der Gedanke der CE spielt bei PKW als Konsumgut für den Kunden emotional eine größere Rolle [E6]. Bei den PKW-OEM ist das Thema bereits tiefer verankert [E1]. Beispielsweise hat BMW 2021 das zirkuläre Visionsfahrzeug iVision Circular vorgestellt und Prinzipien wie „Secondary First“ bei der Fahrzeuggestaltung bereits integriert [E12; Sei-2022, S. 84]. Die NFZ-Industrie ist in der Regel etwa 5-10 Jahre langsamer [E1]. Oft werden bei der Projektplanung Kosten für Nachhaltigkeit noch gar nicht berücksichtigt [E11].

Je höher das Thema CE bei den OEM intern priorisiert wird, desto leichter lassen sich CE-Aktivitäten beginnen. Der NFZ-OEM MAN hat die CE als eines der drei Fokus-Handlungsfelder der Unternehmensstrategie 2021 festgelegt [MAN-2022b, S. 8]. Weiterhin gibt es innerhalb der Unternehmen viele Einzelpersonen, die das Thema CE treiben und damit den Druck erhöhen [E5]. Neben internem Druck fördert der Druck von Kunden und Wettbewerbern den Fortschritt in Richtung CE [E5].

CE umfasst nicht nur die drei Stufen „make, use, recycle“, sondern eine Vielzahl an Maßnahmen, die möglichst hoch im 9R-Modell (vgl. Kapitel 2.2.2) priorisiert und werterhaltend sein sollen [E3]. Recycling ist die letzte Maßnahme zum Schließen des Kreislaufs [E1]. Auf dem Weg zur internen Umsetzung von CE-Maßnahmen sind viele offene Fragen zu klären, z.B. wie Recyclingquoten verbessert werden können, wie hoch Mindestanteile an Sekundärmaterial sein sollen und wie diese CE-Anforderungen in die Fahrzeugentwicklung integriert werden können [E11; E12]. Mit den CE-Maßnahmen sollen nicht nur eine Verbesserung der Nachhaltigkeit sondern auch finanzielle Vorteile einhergehen und damit eine Win-Win-Situation geschaffen werden [E11]. In Zukunft werden „Ökonomie und Ökologie einander bedingen“ [E11].

Ein NFZ-OEM hatte bereits verschiedene Projekte erarbeitet, um CE-Aktivitäten anzugehen. Dabei sollten beispielsweise Machbarkeitsstudien, Analysen, Bewertungen und operative Versuche zur Demontage durchgeführt und die nötigen Partner gefunden werden [E2]. Aufgrund der politischen Unsicherheiten wurde jedoch nicht investiert, weshalb in der Vergangenheit die Fortschritte in Richtung CE teilweise greifbarer waren als heute [E2].

Die Ist-Situation der CE im NFZ-Sektor wird im Folgenden entlang der Wertschöpfungskette von NFZ dargestellt und näher erläutert (vgl. Abbildung 4-1). Im NFZ-Sektor bereits etablierte CE-Aktivitäten sind beispielsweise das Remanufacturing sowie das Abfallmanagement in der Produktion. Neben dem Neukauf bieten die Hersteller z.B. Gebrauchtfahrzeuge an und zusätzliche digitale Services optimieren die Wartung, die Effizienz und die Überwachung der Fahrzeuge. Außerdem steigt seit einigen Jahren der Einsatz von recycelten Materialien.

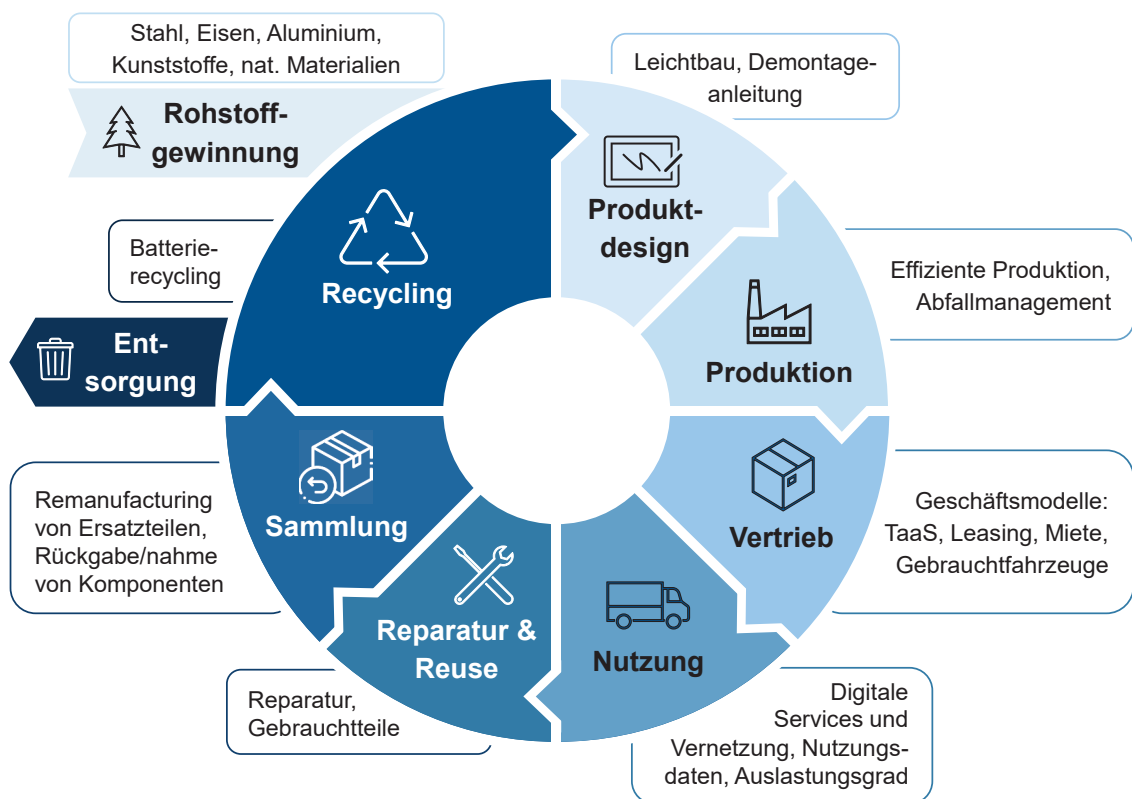


Abbildung 4-1: Ist-Situation der CE im NFZ-Sektor entlang der Wertschöpfungskette (eigene Darstellung)

4.1.1 Rohstoffe, Produktdesign und Produktion

Zu Beginn der Werkstoffkette steht die Wahl und Beschaffung möglichst nachhaltiger Rohstoffe. Das Design eines kreislauffähigen Fahrzeugs soll darauf ausgelegt sein, robust und langlebig zu sein und die Produktion, Reparatur, Demontage und Recycling zu erleichtern. Weiterhin hat die Produktion Einfluss auf den Ressourcenverbrauch und den ökologischen Fußabdruck.

Den größten Anteil am Gewicht eines LKW haben **Stahl und Eisen**. Der durchschnittliche Stahlschrotteinsatz in der Stahlproduktion lag in Deutschland 2021 bei 45 % [BGR-2022, S. 19]. Der mögliche Anteil an Schrott unterscheidet sich je nach Verfahren. Beim Elektrostahlverfahren dürfen bis zu 100 % Stahlschrott eingesetzt werden, während beim in Deutschland weiter verbreiteten Oxygenstahlverfahren nur bis zu 28 % Schrotteinsatz möglich sind [Pro-2020, S. 52]. In NFZ ist folglich Stahl mit entsprechendem Sekundäranteil verbaut, da der Hebel des NFZ-Sektors alleine zu gering ist, um Einfluss zu nehmen und den Anteil zu erhöhen [E1]. Die Volvo Gruppe hat sich das Ziel gesetzt, die Umweltauswirkungen des verwendeten Stahls zu reduzieren, und hat dafür eine Zusammenarbeit mit dem schwedischen Stahlproduzenten SSAB begonnen [Vol-2022b]. Zur Herstellung des neuen,

fossilfreien Stahls werden statt Kokskohle erneuerbare Energie und Wasserstoff eingesetzt, wodurch die Umweltauswirkungen stark verringert werden [Vol-2022b]. Erste LKW, in denen der Stahl für den Rahmen verwendet wurde, wurden bereits ausgeliefert [E3; Vol-2022b].

Etwa 6 % des Gewichts eines LKW macht **Aluminium** aus [Asf-2021, S. 13]. Der durchschnittliche Anteil an Sekundäraluminium in der Aluminiumproduktion lag 2021 in Deutschland bei 53 % [BGR-2022, S. 19]. Folglich ist etwa die Hälfte des in LKW verbauten Aluminiums recycelt. Recycling von Aluminium ist ohne Qualitätsverlust wiederholt möglich, spart 95 % der Energie, die für die Produktion von Primärmetall nötig ist, und reduziert die CO₂-Emissionen um etwa 85 % [BGR-2022, S. 42].

Weitere etwa 5 % des Gewichts eines LKW sind thermoplastische **Kunststoffe** [Asf-2021, S. 13]. Je nach Qualitätsanspruch der Bauteile wird der Rezyklateinsatz geprüft und freigegeben [E6]. Die Materialanforderungen sind historisch gewachsen sehr hoch, was für sicherheits- oder funktionskritische Bauteile gerechtfertigt ist [E1]. Bei vielen Bauteilen, vor allem im Exterieur, lassen sich die Anforderungen jedoch für den Einsatz von Rezyklat anpassen [E6]. Beispielsweise können für nicht motornahe Teile wie Kunststoffabdeckungen Vorgaben zur notwendigen Temperaturstabilität des Kunststoffs gesenkt werden [E1]. Herausforderungen für den Rezyklateinsatz im Interieur können beispielsweise Gerüche oder der dunklere Ton des Rezyklats bei hellen Teilen sein [E6]. Zusätzlich unterscheidet sich die Qualität der verschiedenen Arten von Kunststoffrezyklaten [E6]. Post-industrial-Rezyklat (PIR) besteht aus Abfällen aus der Produktion anderer Produkte, die sortenrein gesammelt werden und das Rezyklat damit eine stabile, gute Qualität hat [GKV-2023, S. 6f]. Die Qualität von Post-consumer-Rezyklat (PCR), Rezyklat aus Abfällen von gebrauchten Kunststoffprodukten, schwankt dagegen zwischen Rezyklat aus gut sortiertem PET-Flaschen-Abfall und dem Kunststoffabfall im gelben Sack [GKV-2023, S. 6f]. Je reiner der Abfall, desto weniger weitere Aufbereitung ist für den Wiedereinsatz nötig, wodurch der Preis ebenfalls sinkt [E6]. PIR ist oft kostengünstiger als das Neumaterial, während bei PCR bei höherem Aufwand z.B. höherem Energiebedarf die Kosten steigen und der ökologische Vorteil sinkt [E6]. Öl für die Herstellung von neuem Kunststoff ist weiterhin günstig [E3]. Motivation für den steigenden Einsatz von PIR waren und sind z.B. Kunststoffknappheit, geringere Kosten für das Rezyklat sowie die Verbesserung der Umweltauswirkungen [E6].

Natürliche Materialien sollen die nicht nachwachsenden Primärmaterialien ersetzen. Beispielsweise werden Einsatzmöglichkeiten von Holz identifiziert, was früher bereits in NFZ verbaut war [E12]. Der Anteil an biobasierten Materialien soll erhöht werden [E3], jedoch kann dies wie bei Biokraftstoffen oder Biokunststoffen auch zu negativen Umweltwirkungen führen, die beachtet werden müssen [E5].

Neben dem Einsatz von recycelten und möglichst nachhaltigen Materialien ist eine klassische CE-Maßnahme zur Reduzierung des Ressourcenverbrauchs der **Leichtbau**. Die

Entwicklung ist ständig auf der Suche nach guten Lösungen, die zu weniger Materialkosten für den Hersteller und weniger Umweltauswirkungen führen und dem Kunden über die Nutzungsphase Einsparungen beim Kraftstoffverbrauch bringen können [E12]. Bei der Entwicklung müssen eine Vielzahl an Faktoren gleichzeitig beachtet werden, um eine wirtschaftliche und nachhaltige Lösung zu finden. Jede Veränderung ist eine Aufwand- bzw. Kosten-Nutzen-Abwägung und zusätzlich müssen mögliche Folgen z.B. auf die Funktionsweise, die Produktion oder die Lebensdauer betrachtet werden [E12]. Materialeinsparungen lohnen sich erst ab einer bestimmten Höhe und alternative Materialien sollen nicht nur wirtschaftlich sondern auch nachhaltig sein [E12].

Das Thema Design for Disassembly ist bisher im NFZ-Sektor kaum präsent [E10]. Remanufacturing ist jedoch verbreitet und die Fahrzeuge auf lange Lebensdauern und damit auch auf Wartung ausgelegt. Es gibt für viele NFZ **Demontageanleitungen**, die auf dem Gebrauchtmarkt eine aktive Rolle spielen [E3], z.B. von Scania [Sca-2021]. Für PKW werden diese Informationen über die Demontage in der ELV-Richtlinie gefordert. Viele Hersteller von PKW aber auch einige Hersteller von NFZ nutzen zur Bereitstellung der Informationen das International Dismantling Information System (IDIS) [IDI-2016].

Ein Ziel einer möglichst **effizienten Produktion** nach Lean-Gedanken ist die Vermeidung von Abfall und Verschwendung [E11]. Abfall, der sich nicht vermeiden lässt, soll möglichst verwertet werden wie z.B. die Kunststoffabfälle in der Industrie, die als PIR genutzt werden [E10]. Auch durch Veränderungen beim Design kann der Ressourcenverbrauch und die Menge an Abfällen in der Produktion verringert werden. **Abfallmanagement** ist eine klassische Maßnahme zur Reduzierung des Ressourcenverbrauchs und schon lange Thema bei den OEM in der NFZ-Industrie [E3; E11]. Trotzdem sollen die kontinuierlichen Verbesserungsmaßnahmen nicht für selbstverständlich gehalten und als Teil aktueller CE-Aktivitäten gezählt werden [E10]. Gesetzlich wird zudem die Vermeidung von Schadstoffen und giftigen Chemikalien geregelt, was am Lebensende das Recycling der Teile erleichtert [E10].

4.1.2 Vertrieb und Nutzungsphase

Im Vertrieb der NFZ sind verschiedene **Geschäftsmodelle** als Alternative zum Kauf eines neuen LKW möglich, die ähnlich von den unterschiedlichen OEM angeboten werden [E3]. MAN bietet **Leasing, Langzeit- und Kurzzeitmiete und Mietkauf** an und verfolgt das Ziel, Anbieter ganzheitlicher Transportlösungen zu werden [MAN-2021, S. 1]. Das Vermietungsgeschäft MAN Rental hat MAN gemeinsam mit der EURO-Leasing GmbH, ebenfalls Teil des VW-Konzerns, ins Leben gerufen [MAN-2021, S. 2]. Beim Leasing unterscheidet MAN in Kilometerleasing, wo monatliche Raten entsprechend der Jahresfahrleistung der Kunden bezahlt werden, in Full-Service-Leasing, wo Wartung und Reparatur inkludiert ist, und in Teilamortisationsleasing, bei dem am Ende der Laufzeit das NFZ vom Kunden erworben wird [MAN-2020]. Mit MAN Top Used bedient MAN den **Gebrauchtmarkt** von LKW

und Bussen von MAN aber auch NFZ anderer Marken sowie von Anhängern [MAN-2023f]. Es werden sowohl gebrauchte Fahrzeuge verkauft als auch von Kunden z.B. von großen Flottenbesitzern angekauft [E9; MAN-2023g]. Vor dem Verkauf werden die Fahrzeuge auf ausreichende Qualität geprüft und bei Kundenwunsch individuell angepasst [MAN-2023h]. Auch für Gebrauchtfahrzeuge werden verschiedene Finanzierungen wie Leasing und zusätzliche Serviceverträge über Wartung und Reparatur angeboten [MAN-2023h].

Standardangebote wie Leasing gibt es jedoch schon lange und haben nur einen kleinen Effekt auf die CE im NFZ-Sektor [E4]. In der Zukunft soll **Truck-as-a-Service (TaaS)** angeboten werden [E3]. Beispielsweise hat das schwedische Startup Volta Truck speziell für den Stadtverkehr konstruierte, elektrische LKW entwickelt und bietet diese im TaaS-Modell an. Dabei erhalten die Kunden durch eine monatliche Gebühr neben dem Fahrzeug mit entsprechender Versicherung, der Telematik und Wartungs- und Reparaturservices auch die Ladeinfrastruktur und Unterstützung bei der Energieversorgung für den Wechsel auf elektrische LKW [Vol-2023a]. Bei allen Geschäftsmodellen soll der positive Einfluss auf die Nachhaltigkeit der Nutzungsphase und die CE immer kritisch betrachtet werden.

Für TaaS und den Wandel des Angebots vom Produkt zur Transportlösung sind **digitale Services und Vernetzung** der Fahrzeuge zentrale Voraussetzung und bei den OEM meist bereits Teil des Angebots. MAN erstellt beispielsweise Analysen für effizienteres, verbrauchsärmeres Fahren und bietet Unterstützung bei der Routenplanung [MAN-2023c]. Durch den Service MAN Now sind je nach Fahrzeug verschiedene Over-the-Air-Softwareupdates möglich, wodurch die Fahrzeuge ohne Werkstattbesuch auf den aktuellen Stand gebracht werden können [E11; MAN-2023e]. Dadurch veralten sie im Betrieb nicht und die Nutzungszeit verlängert sich möglicherweise. Fahrzeugdaten und Wartungsinformationen werden über MAN Service Care gesammelt und dem Kunden zur Verfügung gestellt [MAN-2023a]. Dadurch wird digitale, vorbeugende Wartung möglich, was die Stillstandszeiten der NFZ und die Aufwände für Wartung und Reparatur reduziert [MAN-2023a]. Ähnliche Angebote bietet Volvo Trucks mit Uptime Care und Volvo Connect [Vol-2023b]. Bei Scania stieg die Zahl digital vernetzter Fahrzeuge in den letzten Jahren stetig auf nun fast 600.000 NFZ, etwa 66 % der insgesamt von Scania über 10 Jahre verkauften Fahrzeuge [Sca-2023]. Die Vernetzung und das Teilen der Daten sind die Grundlage für digitale Services zur Optimierung der Nutzungsphase für den Kunden und geben dem OEM gleichzeitig detaillierte Einblicke in die Nutzung der Fahrzeuge [E2; Sca-2023]. **Nutzungsdaten** sind bis zum Lebensende relevant und geben Aufschluss über die Eignung für Weiterverwendung, Aufbereitung und Recycling. Die Daten dürfen jedoch nur erfasst werden, solange der Kunde den Service kauft, weshalb die Erfassung meist nach den ersten Jahren und einem Weiterverkauf der Fahrzeuge endet [E2].

In der Nutzungsphase haben NFZ meist einen hohen **Auslastungsgrad** (vgl. Kapitel 2.1.3), weshalb eine Steigerung der Auslastung nur einen geringen Hebel hat [E1]. PKW stehen

dagegen etwa 95 % der Zeit in der Nutzungsphase still, weshalb Maßnahmen wie Car-sharing zur Optimierung der Ausnutzung bei PKW großes Verbesserungspotenzial haben [E1; Umw-2022a]. Bei NFZ wird die Nutzungsphase vor allem durch die Elektrifizierung nachhaltiger [E1].

4.1.3 Reparatur, Wiederverwendung und Remanufacturing

Durch optimierte und digitale Wartung soll die Verfügbarkeit der Fahrzeuge in der Nutzungsphase maximiert und Werkstattbesuche reduziert werden. **Reparaturen**, die nicht vermieden werden können, werden ebenfalls durch Serviceverträge der Hersteller wie von Volvo Trucks übernommen [Vol-2023c]. Für die Demontage werden spezifisches Demontage-Werkzeug hergestellt und die Demontageanleitungen veröffentlicht [E3].

Werden einzelne Komponenten benötigt, bietet beispielsweise MAN eine **Gebrauchtteilebörse** und Remanufacturing unter dem Namen MAN ecoline an. Gebrauchtteile sind Komponenten, die aus Fahrzeugen ohne weiteren Einsatz ausgebaut, auf ihre Funktionsweise getestet und daraufhin wiederverwendet werden [MAN-2023d]. Lässt sich das Gesamtfahrzeug wiederverwenden, ist dies wirtschaftlicher und nachhaltiger als die Wiederverwendung von Komponenten [E7]. Da keine Aufbereitung stattfindet, müssen sich die Gebrauchtteile in einem gutem Zustand befinden. Sie werden nur wiederverwendet, wenn sich der Ankauf des Fahrzeugs sowie Ausbau, Prüfung, Einlagerung und Verwaltung der Teile wirtschaftlich lohnen, weil die Teile gewinnbringend wieder verkauft werden können und die Nachfrage der Werkstätten bzw. Kunden da ist [E7].

Remanufacturing wird bei den OEM meist bereits seit vielen Jahren durchgeführt und erfährt seit einiger Zeit einen Boom [E9]. Bei MAN wurde Remanufacturing 1992 gestartet und 2018 ein neues Konzept erarbeitet [MAN-2023b]. Da alle OEM wirtschaftlich handelnde Unternehmen sind, sind die primäre Motivation der Remanufacturing-Programme die Kosteneinsparungen, zusätzliche Einnahmen und die Konkurrenz durch unabhängige oder illegale Aufbereitungsunternehmen [E9]. Gleichzeitig sorgt Remanufacturing für Einsparungen von Material, Wasser, Energie und Emissionen und führt zu kostengünstigeren, aufbereiteten Teilen für den Kunden [E9]. Remanufacturing ist damit eine Win-Win-Situation für Nachhaltigkeit und Wirtschaftlichkeit [E11].

Im Vergleich zur Automobilindustrie ist im NFZ-Sektor Remanufacturing viel stärker vertreten, unter anderem da die Einzelteile größer und mehr wert sind und die NFZ längere Lebensdauern haben [Sai-2018, S. 37]. Nach dem Remanufacturing der NFZ-Komponenten werden die Teile mit Herstellergarantie wieder verkauft und unterscheiden sich deswegen von Gebrauchtteilen oder Teilen aus der Feldinstandsetzung in den Werkstätten [E9]. Die Aufbereitung umfasst den Austausch von Einzelteilen, von Verschleißteilen wie Dichtungen oder Lager und das Hinzufügen neuer Modifikationen [MAN-2023b]. Ob das Remanufacturing

beim OEM oder beim Originallieferant stattfindet oder freie Aufbereiter beauftragt werden, ist eine Frage der Kapazität, des Preises und des Stakeholdermanagements [E9]. Die aufbereiteten Teile werden meist **über die Werkstätten als Ersatzteile** verkauft [Nor-2021, S. 69]. Typische Komponenten sind Motoren, Getriebe, Pumpen, Zylinderköpfe oder Schwungräder [MAN-2023b]. Nicht alle Teile sind fürs Remanufacturing geeignet wie z.B. Abnutzungsteile wie Bremsbacken oder sicherheitsrelevante Teile, die aufgrund von Qualitätsvorgaben des Unternehmens nicht aufbereitet werden dürfen [E9; Sai-2018, S. 38]. Eine Herausforderung ist die Verfügbarkeit von allen aufbereiteten Bauteilen im Lager sicherzustellen, um die individuelle Nachfrage decken zu können [E9; Sai-2018, S. 38]. Eine weitere Herausforderung ist die Identifikation weiterer Bauteile, die sich wirtschaftlich aufbereiten lassen [E9]. Die Wirtschaftlichkeit des Remanufacturing wird durch das Verhältnis des Preises, der Produktionskosten und des Energieaufwands zwischen dem Neuteil und der Aufbereitung des Gebrauchtteils bestimmt [Sai-2018, S. 146].

Um die **Rückgabe der Komponenten** zu incentivieren und zu vermeiden, dass die Teile von freien oder illegalen Anbietern aufbereitet und dann günstiger verkauft werden, wird beispielsweise ein Pfandsystem genutzt [E9; Sai-2018, S. 38ff]. Beim Kauf eines Produkts ist ein Pfand enthalten, den der Kunde bei Rückgabe je nach Qualität wieder zurückerhält [E9]. Bei zu geringer Qualität kann das Teil nicht wieder aufbereitet werden, der Kunde erhält nur einen Teil des Pfands zurück und das Teil wird kontrolliert recycelt [E9].

4.1.4 Recycling und Entsorgung

Durch die Elektrifizierung der NFZ ist die aktuelle Herausforderung der OEM das **Batterierecycling** in Zukunft sicherzustellen. Die Rücknahme der Traktionsbatterie am Lebensende ist gesetzlich geregelt und gilt im Gegensatz zur ELV-Richtlinie auch für Batterien aus NFZ (siehe Kapitel 2.2.4) [MAN-2022c]. Die Hersteller müssen die Partnerwerkstätten auf die Rücknahme der Batterien vorbereiten und benötigen ein neues Netzwerk an Recyclern und anderen Partnern, welches MAN und Scania beispielsweise gemeinsam aufbauen [E8; MAN-2022c]. Als Unternehmen des VW-Konzerns ist MAN auch Teil des Recyclingnetzes der Gruppe und profitiert von der Erfahrung aus der Automobilindustrie und bestehender Infrastruktur [E8; MAN-2022c]. Da der Verkauf von BE-LKW mit größeren Stückzahlen als BE-Busse erst anläuft, werden ab in etwa 10 Jahren größere Mengen an Batterie recycelt werden müssen [E8; MAN-2022c].

4.2 Hemmnisse

Dem Wandel zur CE stehen im NFZ-Sektor Hindernisse auf verschiedenen Ebenen gegenüber. Einerseits ergeben sich auf Produktebene aus den Eigenschaften der NFZ technische

Hemmnisse, andererseits gibt es Hürden für die Hersteller der NFZ und weitere marktbedingte Herausforderungen (vgl. Abbildung 4-2). Die Hemmnisse werden im Folgenden näher erläutert und können beispielsweise organisatorisch, kulturell, sozial, finanziell oder regulatorisch sein [BMI-2023].

NFZ- Marktebene	Unternehmensebene	Produktebene
<ul style="list-style-type: none"> • Keine Präsenz von CE • Kaum Kundendruck • Keine gesetzlichen Vorgaben • Politische & marktwirtschaftliche Unsicherheiten • Fehlende Wirtschaftlichkeit und unklarer Business Case • Trägheit der Industrie • Fehlende Definitionen & Einheitlichkeit • Weltweite Unterschiede 	<ul style="list-style-type: none"> • Preissensitivität der Kunden • Keine kurzfristigen Effekte • Fehlende Kapazitäten und Kompetenzen • Fehlende Partner und Netzwerke • Anpassung der internen & externen Zusammenarbeit, Kommunikation, Denkweisen und Kultur • Komplexität der CE • Messbarkeit der CE 	<ul style="list-style-type: none"> • Export der Fahrzeuge • Fehlende Recycling-Infrastruktur • Keine Rücknahme der NFZ durch den Hersteller • Fehlende Nutzungsdaten • Lange Lebensdauern • Nebeneffekte von Maßnahmen

Abbildung 4-2: Herausforderungen für die CE im NFZ-Sektor (eigene Darstellung)

4.2.1 Marktebene

CE hatte im NFZ-Sektor bisher **keine Relevanz** und mögliche Maßnahmen wurden nicht priorisiert [E5]. Es gibt bisher **keine CE-spezifischen Regularien**, die für das gesamte NFZ gelten [Sai-2018, S.52]. In der NFZ-Industrie finden **Veränderungen meist langsam** und in kleinen Schritten statt, wobei die Themen Elektrifizierung und Nachhaltigkeit nun schnelle Aktivitäten fordern und heutige Konzepte bereits in ein paar Jahren wieder veraltet sein werden [E2; E8; E12]. Gleichzeitig führen die aktuellen **politischen und marktwirtschaftlichen Unsicherheiten** beispielsweise aufgrund von Corona, Lieferschwierigkeiten, Teilemangel, dem Ukraine-Krieg, der Inflation und dem Umsatzeinbruch der letzten drei Jahre zu neuen Herausforderungen [E2; VDA-2022b, S. 128]. Die Hersteller befinden sich in einer Art „Schockstarre“ [E2] und Nachhaltigkeitsthemen wie CE-Projekte werden zurückgestellt [E2].

Da die negativen Folgen der linearen Wirtschaft erst mit der Zeit bemerkbar werden und die Umsetzung vieler CE-Maßnahmen **keinen direkten Gewinn** bringt, senkt dies die Motivation, jetzt zu handeln [E5]. Wird erwartet, bis „es anfängt weh zu tun, ist es schon zu spät“ [E3], da die NFZ-Industrie beispielsweise nicht auf eine Materialknappheit vorbereitet ist [E5]. Zusätzlich wird, im Gegenteil zu vielen anderen Branchen, Nachhaltigkeit noch **wenig durch die Kunden eingefordert** [E9]. Die Spediteure agieren stark kostengetrieben und erwarten für einen Aufpreis Mehrwerte wie ständige Verfügbarkeit der Fahrzeuge oder finanzielle Einsparungen in der Nutzungsphase [E3; E9]. Ausschlaggebend für den Kauf sind die TCO [E11]. Die Herausforderung bei allen CE-Maßnahmen ist folglich eine kosteneffiziente Lösung zu finden, da die Kunden nicht bereit sind, für CE mehr zu zahlen [E1; E3].

Während in der Automobilbranche Hersteller mit nachhaltigen Materialien experimentieren, fehlt im NFZ-Sektor dafür der Business Case [E1; E3]. Weiterhin **fehlen eindeutige Definitionen** z.B. für nachhaltige Materialien und den Anteil an Sekundärmaterial [E4; DIN-2023, S. 44]. Dadurch sinkt die **Vergleichbarkeit der Lösungen** der verschiedenen Akteure (z.B. in der Automobilindustrie), da je nach Definition ein hohes Ziel nicht zwingend zu weniger Umweltwirkung führt [E4]. Zusätzlich muss immer geprüft werden, dass Maßnahmen wie der Einsatz von nachhaltigen Materialien auch zu einer realen Verbesserung der Umweltwirkungen führen [E5].

Weiterhin unterscheiden sich die Bedingungen und Gesetze bezüglich Nachhaltigkeit und CE in den **verschiedenen Märkten weltweit** [E3]. Die Herausforderungen sind dieselben, während die lokalen Gegebenheiten, finanziellen und gesetzlichen Anforderungen sowie die Herangehensweise und Priorisierung von CE-Maßnahmen verschieden sind [E2; E3; E11]. Lösungen dürfen nicht nur für Europa funktionieren, sondern sollen langfristig global umsetzbar sein [E3].

4.2.2 Unternehmensebene

Die NFZ-Hersteller handeln als wirtschaftliche Unternehmen stark kostengetrieben und müssen meist auch Aktionäre zufriedenstellen [E5]. Maßnahmen werden deshalb nur umgesetzt, wenn der Business Case für das Unternehmen sowie den Kunden stimmt und die Wirtschaftlichkeit erhalten bleibt [E2; E5]. Die Herausforderung bei CE-Maßnahmen ist, dass die notwendigen Investitionen oft **keine kurzfristigen Einsparungen** versprechen, sondern erst langfristig zu Verbesserungen führen oder aufgrund der Gesetzeslage zwingend notwendig sind [E3; E5]. BE-NFZ haben höhere Verkaufspreise, jedoch werden Einsparung in der Nutzungsphase versprochen. Fossile Materialien sind häufig günstiger als nachhaltige Alternativen und diese Mehrkosten lassen sich aufgrund der hohen **Preissensitivität der Kunden** nicht direkt als Preiserhöhung beim Verkauf weitergeben [E1; E3]. Bisher sind die Preise jedoch nicht real, denn keiner zahlt die Kosten für fossile Rohstoffe und es „geht **auf Kosten des Planeten**“ [E4]. An dieser Stelle muss für CE ein Umdenken stattfinden [E4]. Die technische Innovationswelle wird mit einer Investitionswelle einhergehen [E4]. Die Herausforderung ist herauszufinden, welche Investitionen die größten positiven Umweltwirkungen haben und klare Prioritäten zu setzen, da Wirtschaftlichkeit auch in Zukunft das Entscheidungskriterium ist und die Hersteller in Vorleistung gehen müssen [E11]. Das Ziel soll sein, durch ein zirkuläres Vorbildkonzept für das Fahrzeug und das Geschäftsmodell den Markt durch den Schneeballeffekt zu verändern [E3].

Neue Geschäftsmodelle umfassen zusätzliche Services, für die **zusätzliche Kapazitäten und Kompetenzen** notwendig sind und mit deren Aufbau ein hoher Aufwand einhergeht [E2]. Die OEM müssen den Kundenservice vergrößern und neue Partner finden, um als Produzenten auch Serviceanbieter werden zu können [E2]. Zentrales Element in der CE ist

das Product-Lifecycle-Management, was jedoch von den Herstellern bisher nicht umgesetzt wird [E2]. Es gibt keine Reverse Logistics von NFZ, sondern das Konzept muss gemeinsam mit Partnern erst entwickelt werden [E2; E11]. Die Herausforderung ist, die **richtigen Partner** zu finden und das notwendige Wissen aufzubauen. Beispielsweise werden neue Materialien verbaut oder BE-NFZ auf den Markt gebracht, ohne ein vollständiges Konzept für das EoL-Management zu haben [E10]. Um die Recyclingfähigkeit der verbauten Materialien zu realisieren, sind entsprechende Recyclingpartnerschaften zu bilden und die Zusammenarbeit aller beteiligten Unternehmen im EoL-Management zu steigern [E10; Sai-2018, S. 52]. Idealerweise wird ein Ökosystem geschaffen, das den CE-Wandel im ganzen Sektor fördert [E10]. Dass Partnerschaften auch zwischen den konkurrierenden Herstellern möglich sind, zeigt die Zusammenarbeit von MAN, Scania, Daimler Truck und der Volvo Gruppe bei einem Joint Venture für ein europäisches Hochleistungs-Ladenetz [Vol-2022a].

Um den Wandel zur CE wirkungsvoll anzugehen, sollen die Hersteller die **unternehmensinterne und externe Zusammenarbeit und Kommunikation** fördern [E2]. Die Arbeitsweise muss sich ändern, sodass in Zukunft stärker übergreifend gearbeitet wird und Informationsflüsse zirkulär werden [E2]. Abteilungen wie z.B. die Entwicklung und der Kundenservice werden stärker zusammenarbeiten müssen, da bei der CE alles ineinander greift [E8]. Bisher haben sich die OEM auf Qualität, Produktion und Produktionsoptimierung fokussiert [E2; E5]. Um möglichst schnelle Ergebnisse zu erreichen, sollen die Teams der CE-Projekte crossfunktional aufgestellt sein [E12]. Neben einer Veränderung der Arbeitsweise müssen sich auch das interne Bewusstsein, **die Denkweisen und die Kultur** bezüglich CE verändern. Große Unternehmen sind eher träge und Veränderungen finden langsam statt. Weiterbildung ist die Basis, um CE-Maßnahmen erfolgreich anzugehen, Nachhaltigkeit muss Teil der Kultur werden und Themen wie z.B. der bevorzugte Einsatz von Sekundärmaterial in den Denkweisen der Mitarbeitenden verankert sein [E1; E2; E12].

Aufgrund des Umfangs und der **Komplexität der CE** ist das Thema schwer fassbar, die Umsetzung schwierig und Zusammenhänge fehlen [E2; E12]. Die Wissensbasis und das Verständnis im gesamten Unternehmen muss erst aufgebaut werden [E8]. Die Breite an möglichen CE-Maßnahmen ist groß und betrifft viele Bereiche gleichzeitig, wo radikale Veränderungen nötig werden [E2]. Die vielen, offenen Fragen, die z.B. mit neuen Geschäftsmodellen einhergehen, führen zu Verunsicherung. Konkrete Angaben, wie Prozesse aussehen sollen, welche Genehmigungen notwendig werden oder welche Materialien bevorzugt eingesetzt werden sollen, fehlen an vielen Stellen [E1; E11; E12]. Um CE-Themen schneller voranzutreiben, sollen diese möglichst hoch priorisiert werden, jedoch sieht jede Abteilung die hohe Relevanz ihrer Themen und möchte die eigenen Ziele priorisieren [E5]. Zudem lassen sich bei CE-Aktivitäten **Erfolge schwer messen**, da eine Vielzahl an Parametern gleichzeitig betrachtet werden muss, während sich beispielsweise die CO₂-Bilanz konkret

bestimmen lässt [E3]. Es gibt kein standardisiertes Messverfahren und die verschiedenen Metriken und Tools sind oft nur begrenzt für die eigenen Ziele geeignet und werden noch nicht angewendet [E3; E5].

4.2.3 Produktebene

Auf Produktebene stellt besonders das Lebensende der Fahrzeuge eine Herausforderung dar. Fast alle Experten haben als Hemmnis genannt, dass der Großteil der **Fahrzeuge exportiert** wird und damit in Deutschland am Lebensende nicht zur Verfügung steht [u.a. E2; E3; E9; E11]. 42 % der gebrauchten leichten NFZ aus EU werden vor allem in Entwicklungs- oder Schwellenländer in Afrika, Asien und dem nahem Osten exportiert. 58 % verbleiben in der EU, werden aber innerhalb der EU meist Richtung Osten verkauft [UNE-2022, S. 5]. Die verschiedenen Nutzer von NFZ haben unterschiedliche Anforderungen an das Fahrzeug und die letzten Kunden sind besonders kostenempfindlich, benötigen aber nur minimale Funktionen des LKW [E2]. Leichte wie schwere NFZ sind beim Export nach Afrika meist bereits 15-20 Jahre in Nutzung [UNE-2022, S. 10]. Der Export ist profitabler als die mögliche Entsorgung in Deutschland und verlängert die Lebensdauer der Fahrzeuge, ist aber aktuell keine nachhaltige Lösung und verhindert ein Schließen des Kreislaufs [Sai-2018, S. 45]. Die Fahrzeuge werden in den Importländern am finalen EoL nicht koordiniert verwertet, da die entsprechende **Recycling-Infrastruktur fehlt** [E6; Sai-2018, S. 45].

Für die NFZ-Hersteller spielt es bisher keine Rolle, ob die Fahrzeuge exportiert werden, wie Komponenten und Materialien nach dem Export vor Ort recycelt werden oder wieder nach Europa kommen [E4]. Im Vergleich zum Export stellt die Demontage und das Recycling nur einen kleinen Absatzmarkt dar [Sai-2018, S. 35]. Die **Hersteller nehmen die Fahrzeuge nicht zurück** und geben den Kunden auch keine Anreize für die Rückgabe [E2]. Während die Wertschöpfungskette vom Design über die Produktion bis zum Vertrieb gut organisiert, lean gestaltet, exakt nachverfolgbar und viele Jahre ausgereift ist, fehlt die Reverse Logistics [E2]. Fahrzeuge sind nicht auf vollständige Demontage ausgelegt, auch hier in Deutschland fehlt die Infrastruktur und das Werkzeug und die Prozesse sind ineffizient oder existieren nicht [E2; Sai-2018, S. 14]. Der NFZ-Sektor kann hierbei vom Automobilsektor lernen [Sai-2018, S. 45].

Je häufiger die LKW wiederverkauft werden, desto stärker verlieren die Hersteller den Kontakt und das Wissen über die Fahrzeuge [E3]. Nutzt der Kunde die angebotene Telematik und die verschiedenen Services des Herstellers, können Nutzungsdaten erfasst werden. Werden die Angebote vom nächsten Kunden nicht mehr verwendet und die Erfassung damit nicht erlaubt, kann der weitere Lebensweg nur theoretisch modelliert werden, da **Primärdaten über die Nutzung fehlen** [E2; E11]. Je weniger Daten über ein Fahrzeug zur Verfügung stehen, desto schwieriger ist die Rücknahme und das Recycling von Teilen des Fahrzeugs am EoL [E2; Lac-2020, S. 316]. Nicht nur das Design und die Materialzusammensetzung,

auch die Art der Nutzung und die Lebensdauer beeinflussen die Recyclingfähigkeit [E6]. Beispielsweise lässt sich im Interieur verbauter Kunststoff leichter recyceln, da der Kunststoff im Exterieur lackiert ist und möglicherweise Schadstoffe oder andere Faktoren über den Lebensweg die Qualität mindern [E6]. Unabhängig vom Material ist die Herausforderung beim Recycling, den wirtschaftlichen Wert möglichst hoch zu halten, da Recycling oft zum Downcycling führt [E3].

NFZ haben **lange Lebensdauern**, weshalb heute auf den Markt gebrachte Fahrzeuge noch in 2040 im Einsatz sein können. Das erschwert die Anpassung der Fahrzeuge und die Erfüllung der zukünftigen Anforderungen an Nachhaltigkeit und CE in den nächsten 10-20 Jahren [E5]. Schnelle Veränderungen der NFZ werden durch klassischerweise evolutionäre Verbesserungen der Fahrzeuge und seltene neue Fahrzeuggenerationen erschwert [E5]. Eine weitere Herausforderung ist die notwendige **Abschätzung der Auswirkungen** bei jeder Veränderung, die beispielsweise eine anderes Material oder ein neues Design auf den Rest des Fahrzeugs haben [E2].

4.3 Treiber

Aus den Ergebnissen der SWOT Analyse ergeben sich eine Reihe von Treibern für die CE im NFZ-Sektor. Im Folgenden werden sowohl die intrinsischen Treiber, wie die Gewinnmaximierung und Kostenminimierung, als auch die extrinsischen Treiber, wie die marktwirtschaftlichen, politischen und gesetzlichen Anforderungen, der NFZ-Hersteller beschrieben (vgl. Abbildung 4-3) [E10]. Die Trennung in intrinsische und extrinsische Treiber dient lediglich der besseren Strukturierung, eine eindeutige Trennung ist nicht möglich, da sie oft ineinandergreifen.

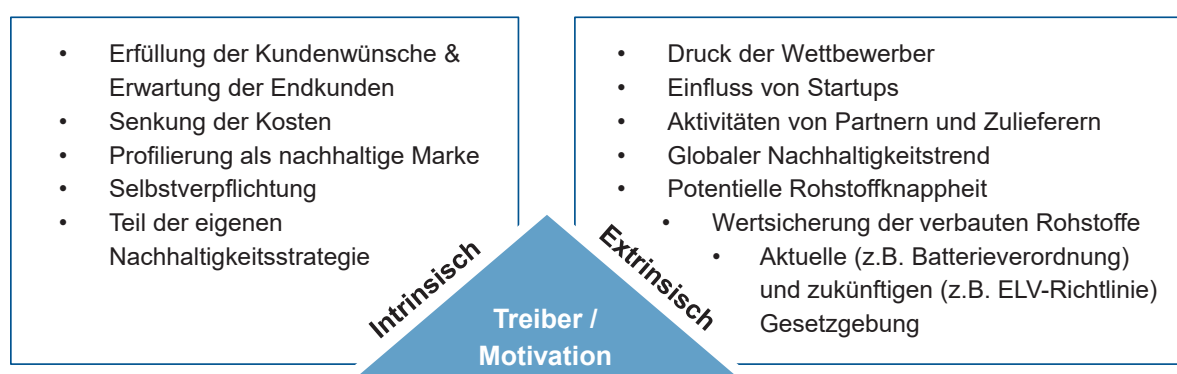


Abbildung 4-3: Treiber der CE im NFZ-Sektor (eigene Darstellung)

4.3.1 Intrinsische Treiber

Ziel jedes wirtschaftlichen Unternehmens ist die Wertgenerierung durch die **Erfüllung der Kundenwünsche**. Erwarten die Kunden zirkuläre Produkte, beschleunigt dies den Wandel

zur CE im Sektor. Aktuell ist die Kundennachfrage nach CE und zirkulären Fahrzeugen jedoch speziell bei LKW noch gering [E5]. Im Vordergrund steht die Dekarbonisierung und der CO₂-Fußabdruck der Fahrzeuge [E1]. Busse werden oft von öffentlichen Kunden über Ausschreibungen gekauft, in denen bereits höhere Anforderungen an Nachhaltigkeit und CE enthalten sind [E8; E11]. Es werden z.B. Informationen zur Recycling- und Verwertbarkeit, zur Materialzusammensetzung und zum Anteil an Sekundärmaterial gefordert [E5]. Zudem wird die Rücknahme der Batterie bei BEV vom Hersteller erwartet [E5]. Bei den LKW-Kunden steigen die **Erwartungen der Endkunden**, die ihre Lieferketten grüner gestalten wollen und gesetzlich geforderte Angaben über die Ökobilanz machen müssen [E1; E10; E11]. Die NFZ-Hersteller müssen auf die Kundenforderungen eingehen und diese in der Wertschöpfungskette an ihre Zulieferer weitergeben [E11]. Bis der Kundendruck nach CE in der Logistikbranche und damit bei den NFZ-Herstellern größer wird, wird es jedoch noch dauern, da bis 2030 und darüber hinaus die Aufmerksamkeit auf Dekarbonisierung durch alternative Antriebe und erneuerbaren Strom liegt [E1]. Die OEM müssen jedoch nicht auf die Forderungen der Kunden warten, sondern können Veränderungen den Kunden auch vorgeben [E4].

Genauso wie die Speditionen streben die NFZ-Hersteller eine Maximierung des Gewinns an. Einige CE-Maßnahmen wie die Reduzierung des Abfalls, des Materialbedarfs, des Energieverbrauchs und günstigeres, recyceltes Material führen zu **sinkenden Kosten** [E6; E10]. Abschreckend stehen dem hohe Investitionen gegenüber, die sich erst langfristig auszahlen werden. Ein höherer Marktanteil z.B. durch neue Geschäftsmodelle oder Re-manufacturing auf dem Gebrauchtmrkt sichert Einnahmen [E9]. Die schnelle Umsetzung von CE-Maßnahmen kann die **Profilierung als nachhaltige Marke** ermöglichen und die Außenwahrnehmung stärken, wie bereits bei elektrischen Bussen zu beobachten ist [E12]. Die Vermarktung darf jedoch kein Greenwashing sein [E10].

Ein weiterer intrinsischer Treiber ist die **Selbstverpflichtung der Hersteller** zur Erfüllung der eigenen Nachhaltigkeitsziele [E5]. Bei MAN ist die CE wichtiger **Teil der Nachhaltigkeitsstrategie** [MAN-2022b, S. 25]. Daneben hat sich MAN der Science Based Targets Initiative verpflichtet und strebt somit wissenschaftsbasierte Reduktionsziele für die THG an, um einen realen Beitrag zum Klimaschutz zu leisten [E2; E11; MAN-2022b, S. 14].

4.3.2 Extrinsische Treiber

In vielen Interviews wurde die Refactory von Renault als Vorzeigebispiel genannt (vgl. Kapitel 2.3.7) [u.a. E2; E4]. In der Automobilindustrie hat BMW das iVision Circular Konzeptfahrzeug vorgestellt [E12; Sei-2022]. Bisher fehlen die CE-Fortschritte im NFZ-Sektor, weshalb kaum **Druck der Wettbewerber** zu spüren ist, aber die Hersteller dürfen sich nicht darauf ausruhen [E5]. Ideal, um die Vorreiterrolle einzunehmen, wäre die Entwicklung eines NFZ, das Maßstäbe bezogen auf die CE setzt [E11]. Auch **Startups** entstehen in vielen

Nischenbereichen und beeinflussen direkt oder indirekt den NFZ-Sektor [E8; Unt-2023], wie z.B. autonome LKW von einride [Ein-2023] oder elektrische Stadt-LKW von Volta Trucks [Vol-2023a]. Da die Startups von Beginn an Prozesse, Produkte und Geschäftsmodelle neu denken können, entstehen neuartige Lösungen für die Industrie [E3]. Wie Renault in der Refactory könnten auch die NFZ-Hersteller Startups fördern, beispielsweise in eigene Accelerator Programme aufnehmen und sich damit auch neuen Geschäftsmodellen öffnen [E1].

Neben der direkten Konkurrenz und den Kunden beeinflussen auch **Partner und Zulieferer** den Fortschritt in Richtung CE. Fangen Zulieferer wie große Stahlhersteller an, den Fokus auf emissionsärmeren Stahl zu legen, oder erhöhen andere Unternehmen die eigenen Recyclingquoten, kann der NFZ-Sektor davon profitieren und die eigenen Produkte und Geschäfte zirkulärer ausrichten [E1]. Mit neuen Partnern können gemeinsame CE-Lösungen aufgebaut und Themen global vorangetrieben werden [E3].

Alle Marktteilnehmer im NFZ-Sektor werden genauso wie alle anderen Industrien vom **globalen Nachhaltigkeitstrend** und dem damit verbundenen gesellschaftlichen Druck berührt und müssen sich intensive Gedanken um Nachhaltigkeit machen [E2; E11]. Von diesem Momentum können auch CE-Themen profitieren und das noch geringe Bewusstsein für CE steigern [E1]. Auch die Trends autonomes Fahren und Digitalisierung können die CE fördern [E11; Ant-2018, S. 1].

Geopolitische Unsicherheiten treiben die Absicherung der Lieferketten und der Ressourcenverfügbarkeit voran [E2; E5]. Oft fehlt jedoch noch der Zugang zu alternativen Materialien [E3]. Ein geschlossener Materialkreislauf reduziert die Auswirkungen **potenzieller Rohstoffknappheiten**, damit verbundener Rohstoffpreissteigerungen und verbessert die Resilienz [E5; E8; Sai-2018, S. 45]. Mit CE-Maßnahmen soll nicht erst bis zum Eintreten eines Mangels wie in der Vergangenheit der Knappheit von Gummi [Sai-2018, S. 10] oder Kunststoff [E6] gewartet werden. Aktuell ist beispielsweise der Zugang zu Halbleitern eingeschränkt [E3]. Sobald eine Materialverknappung auftritt, sollen die CE-Kreisläufe bereits aufgebaut sein, da aufgrund der Trägheit der Industrie keine schnelle Reaktion erwartet werden kann [E5]. Ohne ein gut organisiertes EoL-Management geht der hohe Restwert der NFZ, der sich aus den verbauten Materialien ergibt, am EoL verloren [E3]. CE-Maßnahmen zum Schließen des Kreislaufs ermöglichen die **Wertsicherung** [E3].

Daneben haben die Lokalpolitik, neue Gesetze und Subventionen Einfluss auf den Weg zur CE. Ziel der NFZ-Hersteller ist es, proaktiv Themen zu treiben und nicht erst auf neue Gesetze zu reagieren [E11]. Durch Lobbyarbeit können sie die **Gesetzgebung der Zukunft** mitgestalten [E3]. In der EU werden eine Vielzahl an Gesetzen parallel überarbeitet und verabschiedet (vgl. Kapitel 2.2.4), die von den OEM beachtet werden müssen [E10]. Im Tagesgeschäft liegt deshalb die Priorität auf der Erfüllung der Gesetze und der dort vorgegebenen Zeitschiene [E10].

In vielen Interviews wurde genannt, dass die ELV-Richtlinie in Zukunft auch auf NFZ ausgeweitet wird [u.a. E2; E5; E8]. Dies ist von der EU strategisch vorgesehen [E2], eine Entscheidung und öffentliche Kommunikation der geplanten Veränderung gibt es aber noch nicht. Die EU hat die Richtlinie evaluiert und die verschiedenen Argumente für und gegen die Aufnahme der fehlenden etwa 25 % der Fahrzeuge wie schwere LKW, Busse oder Motorräder betrachtet [Eur-2021, S. 43]. Demnach unterstützen viele Akteure grundsätzlich die Erweiterung, jedoch können die aktuellen Vorgaben aufgrund anderer Fahrzeugeigenschaften, Lebenswege und Anforderungen an EoL-Behandlungen nicht einfach übertragen werden [Eur-2021, S. 43f]. Der Verband der europäischen Autohersteller ACEA hat sich 2020 gegen die Erweiterung ausgesprochen [ACE-2020]. Die EU hat die **Erweiterung der ELV-Richtlinie** 2021 als relevant eingestuft, weshalb nun potentielle wirtschaftliche und soziale Folgen näher analysiert werden [Eur-2021, S. 71]. Aktuell gibt es für schwere NFZ keine EU-Vorgabe zum EoL der Fahrzeuge [Eur-2021, S. 71]. Die NFZ-Hersteller fangen an, sich Gedanken zu machen, welche Auswirkungen eine ELV-Richtlinie für den NFZ-Markt haben wird [E10]. Neue Gesetze bergen das Risiko einer Überregulierung, die zu hohem Aufwand und hohen Investitionen bei wenig Verbesserung führt. Gleichzeitig würde ein neuer Gesetzentwurf den Druck auf den NFZ-Sektor erheblich steigern und die Priorität von CE-Maßnahmen würde steigen.

Neben der ELV-Richtlinie beschäftigen weitere neue Gesetze den NFZ-Sektor. Bei jedem Gesetz ist die Frage, ob und wie das Gesetz auch für NFZ gilt [E10]. Die neue **Batterieverordnung** reguliert den Lebensweg von Antriebsbatterien, worunter auch die in NFZ verbauten Batterien fallen [hes-2020; DIN-2023, S. 70]. Mit dem beginnenden Verkauf der BE-LKW muss auch das System rund um den Lebensweg der Traktionsbatterie aufgebaut werden [E3]. Die Umsetzung des Gesetzes stellt eine Lernphase für die OEM dar, da die Erkenntnisse auf das ganze NFZ übertragen werden könnten [E3]. Weitere Gesetze wie die Nationale Kreislaufwirtschaftsstrategie oder die Ökodesignverordnung werden in nächster Zeit neu bzw. überarbeitet veröffentlicht oder treten in Stufen in Kraft [E10].

4.4 Potenziale

Auf dem Weg vom aktuellen Status Quo zur CE im NFZ-Sektor gilt es, Hemmnisse zu überwinden, innovative Maßnahmen zu erarbeiten und nachhaltige Konzepte umzusetzen. Im Folgenden werden die Pläne und Wunschvorstellungen der NFZ-Hersteller aufgezeigt, die in den Experteninterviews genannt wurden oder sich aus der Literatur ergeben. Die möglichen Ansatzpunkte für CE sind zeitlich in kurz- (K), mittel- (M) und langfristig (L) eingeteilt. Sie werden in Abbildung 4-4 entlang der Wertschöpfungskette dargestellt und im Folgenden näher erläutert. Damit wird lediglich ein Überblick geschaffen, da die Maßnahmen weiter detailliert, Abhängigkeiten identifiziert und weitere innovative Ideen entwickelt werden können und sollen.

Für ein erfolgreiches CE-Konzept sind laut [E2] vier Faktoren zu beachten. Das Geschäftsmodell soll zirkulär sein, die Technik eine Verlängerung der Lebensdauer zulassen, die Lieferkette nicht nur für die Zulieferung und den Vertrieb, sondern auch auf die Rückgabe ausgelegt sein, und die IT die Datennutzungen ermöglichen [E2]. Um erfolgreich am Aufbau der CE zu arbeiten, sind in Zukunft mehr Ressourcen, mehr Mitarbeitende mit steigendem Bewusstsein und CE-Ideen und eingeplantes Budget für Nachhaltigkeit in Projekten nötig [E2; E11].

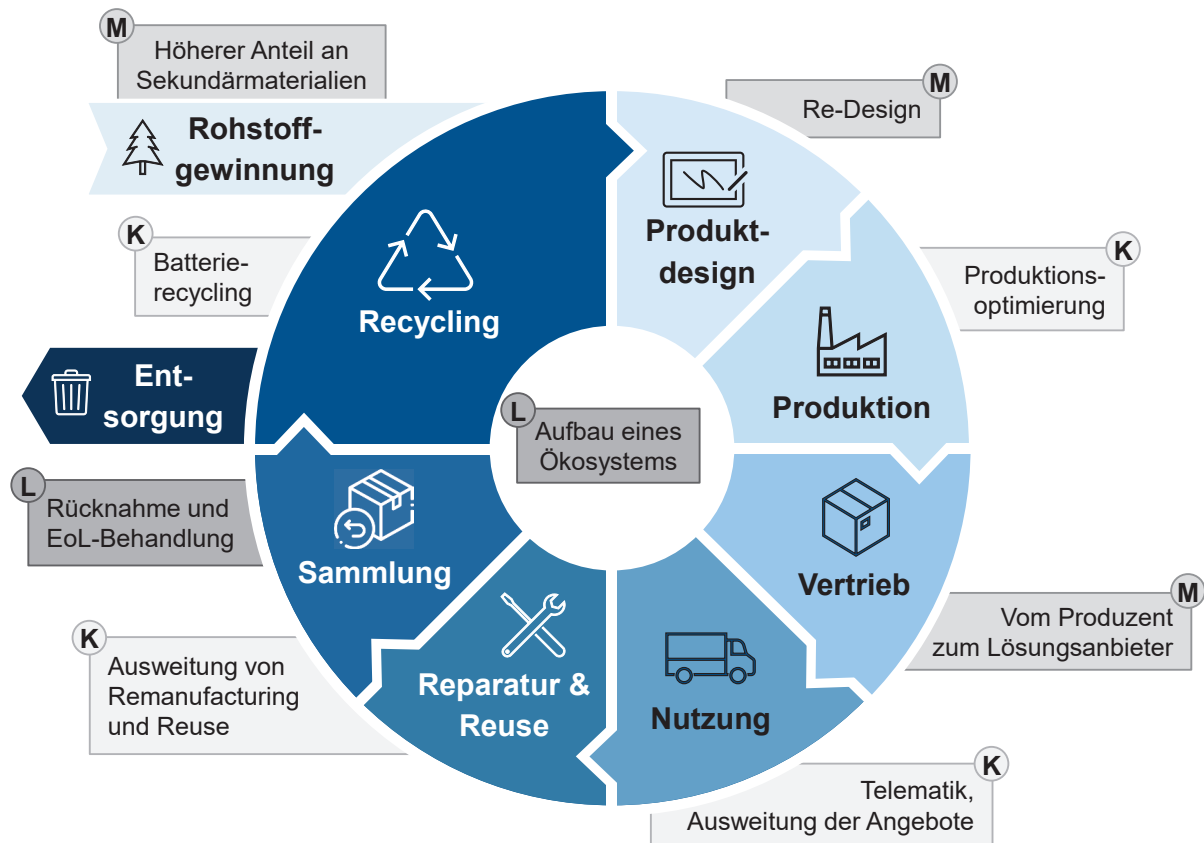


Abbildung 4-4: Kurzfristige, mittelfristige und langfristige potenzielle Maßnahmen der CE im NFZ-Sektor entlang der Wertschöpfungskette (eigene Darstellung)

4.4.1 Kurzfristige Ergebnisse

Vergleichsweise schnelle Ergebnisse lassen sich durch Ausweitung und Optimierung der aktuellen CE-Maßnahmen in der NFZ-Industrie erzielen. Die Kreisläufe **Remanufacturing und Reuse** funktionieren im NFZ-Sektor bereits gut [Sai-2018, S. 35]. Bei Bussen gibt es beispielsweise die Maßnahme eines „Midlife Upgrades“, bei dem Bestandteile wie die Sitze im Interieur ausgetauscht werden und der Bus weiter eingesetzt werden kann [E2]. Mit jeder aufbereiteten Komponente können Ressourcen gespart und der Lebensweg des Teils und möglicherweise des Fahrzeugs verlängert werden. Gleiches gilt für Gebrauchteile, die direkt wieder eingesetzt werden. Vor allem statische Teile wie z.B. die Stufen am

Fahrerhaus können ohne technische Reparatur direkt wiederverwendet werden [E2]. Für das Remanufacturing können aufbauend auf den bisherigen Komponenten zusätzliche Teile identifiziert werden, die sich ebenfalls aufbereiten lassen [E2; E11]. Bei MAN ecoline ist bereits in Planung, weitere Komponenten in das Portfolio aufzunehmen wie z.B. Steuergeräte [MAN-2023b]. Existierende Infrastruktur kann ausgeweitet und optimiert werden, um von aktuell unregelmäßigen Rückläufern vorhersagbare Mengen zu erreichen [E2]. Nicht mehr fahrtüchtige Gebrauchtfahrzeuge können angekauft werden, deren Komponenten aber noch wiederverwendbar oder aufbereitbar sind. Da ein Fahrzeug als Ganzes mehr Wert als seine Einzelteile ist, soll abgewogen werden, wann die Rücknahme und Zerlegung des Fahrzeugs ökologisch und ökonomisch sinnvoller wäre, als ein Fahrzeug als Gebrauchtfahrzeug zu verkaufen, möglicherweise zu exportieren und bis zum Ausfall und EoL zu nutzen [E7]. Hierbei zählt, ob und wo das Fahrzeug am EoL trotzdem korrekt recycelt und der Wert erhalten wird [E3].

Weiterhin ist kurzfristig relevant, ein Konzept für **Batterien am EoL** zu entwickeln und dies in den nächsten Jahren umzusetzen. Da erste BE-NFZ bereits auf dem Markt sind, soll das Thema in Vorbereitung auf die Rücknahme der Batterien bei steigenden Verkaufszahlen bereits jetzt angegangen werden [E8]. Während der Nutzungsphase ist die erste Maßnahme zur Maximierung der Erstnutzung die Reparatur, um die Lebensdauer bis zum EoL zu verlängern [MAN-2022a; Etx-2023, S. 2]. Darauf folgt, gebrauchte Batterien je nach Zustand und Kapazität in anderen Fahrzeugen mit geringen Leistungsanforderungen zu verbauen („Second Use“) oder für andere Zwecke zu verwenden („Second Life“) z.B. für stationäre Energiespeicher [E8; Mon-2022, S. 3; MAN-2022a]. Die Batterien sollen zugänglich, reparierbar und austauschbar gestaltet sein. Je länger die Batterien im Einsatz bleiben, desto besser sind die Umweltwirkungen [Etx-2023, S. 2].

Ist der weitere Einsatz nicht mehr möglich, folgt das **Batterierecycling**, wobei z.B. MAN auf die Erfahrung mit BEV von VW aufbauen kann [E8; MAN-2022a]. Um den Kreislauf zu schließen, sollen Demontage und Recycling beim Design der Batterien von Beginn an beachtet werden [E8]. Da Rohstoffpreissteigerungen bei steigender Nachfrage zu erwarten sind und um den hohen CO₂-Fußabdruck der Batterie nach der Produktion zu senken, soll in einem geschlossenen Kreislauf möglichst viel recyceltes Material als Sekundärmaterial wieder eingesetzt werden [E8]. Die Hersteller müssen entscheiden, wie das Ziel des geschlossenen Kreislaufs erreicht werden soll, welche Rolle sie dafür im Recyclingprozess der Batterien spielen wollen und ob Maßnahmen nicht nur nach Wirtschaftlichkeit sondern auch nach Nachhaltigkeit ausgewählt und über die gesetzlichen Anforderungen hinaus umgesetzt werden sollen [E8]. Die Erfahrung aus dem Aufbau des Batteriekreislaufs können die NFZ-Hersteller für den Aufbau der CE in der Industrie nutzen [E3].

Digitale Services und Vernetzung der Fahrzeuge durch **Telematik** ist in den letzten Jahren stetig gewachsen. Die Angebote können optimiert und ausgeweitet werden, um die Wartung weiter zu reduzieren, die Nutzungsphase zu optimieren und zusätzlich die Grundlage für

die Rücknahme von NFZ zu legen [E2]. Auf Basis der erfassten Daten kann z.B. die Rücknahme von Gebrauchtfahrzeugen proaktiv geplant und automatisiert werden, wodurch der Weiterverkauf optimiert werden kann [E2; Ant-2018, S. 47].

Die **Optimierung der Produktion**, die Reduktion des Ressourceneinsatzes und die Identifikation von Abnehmern für den eigenen Abfall als Ressource kann kurzfristig ebenfalls zu weiteren Verbesserungen führen [E3]. Daneben kann untersucht werden, wo sich die Komplexität und Variantenvielfalt verringern lassen, indem beispielsweise dem Kunden weniger Wahlmöglichkeiten gegeben werden [E4].

4.4.2 Mittelfristige Verbesserungen

Um langfristig Demontage und Recycling zu ermöglichen, wenn die Rücknahme der NFZ sichergestellt ist, sind zuvor **Veränderungen im Design (Redesign)** notwendig. Das Design soll möglichst für die Produktion, die Reparatur, die Demontage und das Recycling optimiert sein [E5; E10]. Beispielsweise sollen Verbundstoffe, Beschichtungen, stoffschlüssige Verbindungen wie Kleben oder Materialmix vermieden und Komponenten modularisiert werden [E4; E5; E6; E12]. Dadurch wird sortenreine Trennung und Recycling erleichtert [E5]. Besonders kritische Materialien sollen im Kreislauf verbleiben [E10]. Neue Kommunikationswege zwischen Abteilungen wie der Forschung und Entwicklung und der EoL-Behandlung werden nötig [E8]. Aufgrund der verschiedenen Anforderungen müssen Veränderungen abgewogen werden, da mit jeder Maßnahme neben den erwünschten Verbesserungen weitere Folgen verbunden sind [E12]. Um Entscheidungen zu treffen, wenn beispielsweise ein Alternativmaterial mit optimierter Recyclingfähigkeit zu einer geringeren Haltbarkeit und Lebensdauer führen würde, müssen klare Prioritäten und Ziele gesetzt werden [E2; E12]. Bei einer Entwicklungsdauer von NFZ von etwa 5 Jahren müssen Veränderungen im Design so bald wie möglich vorgenommen werden, um diese mittelfristig realisieren zu können [E3; E5]. Die Fahrzeuge können über 20 Jahre im Einsatz bleiben, weshalb gute Prognosen wichtig sind, was in Zukunft relevant sein wird.

In der Forschung und Entwicklung spielt neben der theoretischen Recyclingfähigkeit der Materialien der aktuelle **Anteil an Sekundärmaterial** eine wichtige Rolle. Übergeordnetes Ziel soll sein, den Verbrauch von Primärmaterial zu verringern [E5]. Da Rezyklat andere Eigenschaften haben kann, muss der Einsatz in den verschiedenen Komponenten entsprechend der Qualitätsvorgaben geprüft werden [E4; E5]. Weiterhin ist zu prüfen, ob Rezyklat des gewünschten Materials überhaupt verfügbar ist, nachhaltiger ist und die notwendigen Technologien existieren [E4]. Der Zugang zu Sekundärmaterial kann durch den schrittweisen Aufbau eines größeren Netzwerks, neue Technologien, höhere Anforderungen an Zulieferer oder CE-Maßnahmen von Lieferanten verbessert werden [E3; E4]. Hier kann die NFZ-Industrie von der Automobilindustrie lernen und das Gestaltungsprinzip „Secondary First“ wie BMW implementieren [Sei-2022, S. 84]. Der Einsatz von Rezyklat schafft alleine

keine Lösung für die CE, sondern weitere Maßnahmen zum Schließen des Kreislaufs sind nötig [E2]. Grundsätzlich stellt die Sicherung des Ressourcenzugangs eine Herausforderung der nächsten Jahre dar [E2].

Mittelfristig bewegen sich die NFZ-Hersteller weiter auf dem Weg zum **Lösungsanbieter**. Es gibt bereits verschiedene Vertriebsmodelle und ein wachsendes Angebot an Services. Die OEM arbeiten jedoch schon immer produktorientiert und „können nicht einfach zum Serviceanbieter werden“ [E2]. Die Herausforderung ist, die entsprechenden Partner zu finden, um beispielsweise TaaS als wirtschaftliches und nachhaltiges Geschäftsmodell zu realisieren [E2; E3]. Wie bei allen anderen Maßnahmen ist auch mit TaaS alleine die CE nicht erreicht, sondern die Nutzungsphase wird optimiert [E3].

4.4.3 Langfristige Veränderungen

Auf lange Sicht birgt der **Aufbau eines Ökosystems** großes Potenzial, die CE nachhaltig zu fördern. Nachdem das eigene Unternehmen zirkulär ausgerichtet ist, sind die nächsten Schritte das stärkere Einbeziehen der Kunden und die gemeinsame Gestaltung des Geschäfts zusammen mit Partnern auf dem Weg zum CE-Ökosystem [Nor-2021, S. 124]. Darin zeigt sich die ganzheitliche Herangehensweise, die für CE notwendig wird, da einzelne Maßnahmen nicht den notwendigen Wandel ermöglichen.

Ein CE-Ökosystem kann dabei helfen, die große Herausforderung der **Rücknahme und EoL-Behandlung** der LKW zu erleichtern. Dafür müssen Reverse Logistics und damit verbundene Infrastruktur gemeinsam mit Partnern aufgebaut werden [E11]. Bisher verlieren die Hersteller den Kontakt zu den NFZ im Laufe der Nutzungszeit und es kommen kaum Fahrzeuge am EoL zurück zum Hersteller [E2]. Die Demontage der aktuell kleinen Anzahl an Fahrzeugen funktioniert in Werkstätten sehr manuell [E2]. Ob und wie sich die Exporte durch zukünftige gesetzliche Vorgaben (z.B. zum Export von kritischen Rohstoffen [Eur-2023b]) oder durch die Elektrifizierung und dem damit verbundenen Bedarf an Ladeinfrastruktur im Zielland verändern werden, wird sich bei steigenden Produktions- und Verkaufszahlen zeigen [E3; E10]. Eine Annahme ist, dass die LKW größtenteils in Europa bleiben werden [E3]. Bisher gibt es jedoch kein System, um Fahrzeuge aus Osteuropa oder anderen Ländern zurückzunehmen, aufzubereiten und zu recyceln [E4]. Ohne die Rücknahme der LKW und die entsprechende Infrastruktur lässt sich kein geschlossener Kreislauf erreichen.

5 Diskussion und Fazit

Diese Semesterarbeit gibt einen grundlegenden Einblick in den NFZ-Sektor und aktuelle Entwicklungen in Richtung CE. Dies stellt den Startpunkt für weitere Forschung dar, um die Transformation zur CE voranzutreiben.

5.1 Limitierungen

CE ist ein aktuelles Trendthema, weshalb es regelmäßig neue Veröffentlichungen gibt. Die steigende Relevanz des Themas CE lässt sich an der jährlich zunehmenden Anzahl an Suchergebnissen in den verschiedenen Datenbanken erkennen. Während sich die Automobilindustrie das Thema Nachhaltigkeit und Zirkularität bereits auf die Fahnen geschrieben hat, gibt es bisher aber nur wenige Veröffentlichungen zur CE im NFZ-Sektor. Die Ergebnisse der Literaturanalyse waren damit sehr begrenzt.

Ergänzend wurden Experteninterviews durchgeführt, um einen aktuellen Einblick in den Status Quo zu erhalten und Hemmnisse und Potenziale zu identifizieren. Da jedoch 8 der 12 Interviewpartner beim gleichen NFZ-OEM arbeiten, können die Ergebnisse zu einem einseitigen Blick auf den NFZ-Sektor führen. Um dies zu vermeiden, das Blickfeld zu erweitern und die Aussagen zu validieren, wurden weitere 4 Interviews mit Experten aus Konkurrenzunternehmen und Beratungen durchgeführt. Aufgrund der begrenzten Anzahl an Interviewpartnern insgesamt sind die Ergebnisse nur beschränkt repräsentativ und die Auswertung ist subjektiv. Trotzdem bieten die Erkenntnisse aus den Interviews einen guten Überblick, da alle Interviewpartner verschiedene Expertisen und damit individuellen Mehrwert gebracht haben, und sich gleichzeitig die Antworten in vielen Punkten entsprochen haben.

5.2 Ausblick

In dieser Arbeit wurde der aktuelle Stand der CE im NFZ-Sektor betrachtet. Um den Wandel der Industrie zur CE in Zukunft zu fördern, sind entsprechende Ideen und Konzepte zu entwickeln und umzusetzen. Die in Kapitel 4.4 aufgezeigten Potenziale haben nicht das Ziel der Vollständigkeit. Weitere individuelle Ideen für die Umsetzung bei den OEM oder anderen Akteuren lassen sich möglicherweise entlang der in Kapitel 2.2.2 vorgestellten Frameworks oder durch Verwendung des Business Model Canvas [vgl. Nor-2021, S. 7] identifizieren und detaillieren. Die Unternehmen sollen dafür ihren individuellen Ausgangspunkt kennen und klar definierte Ziele haben [Nor-2021, S. 31].

Der individuelle Ausgangspunkt kann z.B. durch Reifegradmodelle bestimmt werden (vgl. Kapitel 2.2.3). [Gar-2019] hat ein „Circularity Measurement Toolkit“ speziell für produzierende Unternehmen entwickelt, um den eigenen Grad der Zirkularität zu bestimmen. Der erarbeitete Fragebogen kann helfen, die richtigen Fragen zu stellen, Potenziale zu identifizieren und die Komplexität der CE leichter zu erfassen. Dafür wird nicht nur nach produkt- und prozessbezogenen Aktivitäten zur optimierten Ressourcennutzung und Lebensdauer gefragt. Genauso werden das Bewusstsein innerhalb des Unternehmens, in der Lieferkette und bei Kunden, interne Weiterbildung, die Einhaltung der Gesetze sowie neue Partnerschaften und andere Anreize zur Verbesserung der Nachhaltigkeit und CE betrachtet. [Gar-2019, S. 10ff]

Mit dem Reifegradmodell von [Gar-2019] wird an dieser Stelle nur ein Beispiel für ein Tool gegeben, um eine mögliche Herangehensweise darzustellen und Denkanstöße zu geben. Jedes Unternehmen muss aufgrund der Komplexität und der schwierigen Messbarkeit der CE selbst definieren, welche Modelle und Tools zur Analyse, Beurteilung und Verwaltung der eigenen Zirkularität geeignet sind [E3; E5].

Je nach Ausgangspunkt können zukünftige Maßnahmen abgeleitet und bewertet werden. Es muss betrachtet werden, für welche NFZ und welche Kundengruppe die Maßnahmen geeignet sind, wie viele Ressourcen und welche Technologien notwendig sind. Maßnahmen mit hohem Potenzial können weiter detailliert und validiert werden. Mithilfe von Pilotprojekten können Veränderungen greifbar werden und Leuchttürme für den Wandel geschaffen werden [E4]. „Unternehmen sind oft in der strategischen Diskussion gefangen“ und machen dadurch keine Fortschritte [E4]. Die Auswahl, Umsetzung und Integration der CE-Maßnahmen im Unternehmen stellt eine große Herausforderung dar, die auf die Akteure im NFZ-Sektor zukommt.

5.3 Fazit

Die NFZ-Industrie steht vor einem Wandel in Richtung Nachhaltigkeit, welcher mit der Elektrifizierung der NFZ begonnen hat. Aufgrund der hohen Laufleistungen und Lebensdauern der NFZ sind die negativen Umweltwirkungen in der Nutzungsphase besonders hoch und lassen sich durch alternative Antriebe senken. Bei BE-NFZ, die aktuell im Fokus stehen, stellen die regulatorischen Anforderungen und die hohen Umweltwirkungen der Antriebsbatterie eine Herausforderung dar. Während bei NFZ das EoL hier in Deutschland bisher kaum Relevanz hatte, müssen die NFZ-Hersteller nun die Verantwortung für die EoL-Behandlung der Antriebsbatterie übernehmen. In Zukunft werden sich auch für das Gesamtfahrzeug die gesetzlichen Anforderungen ändern und speziell bei Bussen, öffentlichen Kunden und auf-

grund erhöhter Endkundenanforderungen auch bei LKW der Kundendruck erhöhen. Es wird jedoch noch einige Jahre dauern, bis nicht nur die Anforderungen an den CO₂-Fußabdruck sondern auch an die Zirkularität der Fahrzeuge steigen.

Die Kreisläufe zur Verlängerung der Lebensdauer von NFZ wie Reuse und Remanufacturing sind bereits etabliert. LKW werden je nach Zustand des Fahrzeugs und Anforderungen der Kunden häufig gebraucht weiterverkauft und exportiert, wodurch die Lebensdauer maximal ausgenutzt wird. Hier setzt die Herausforderung an, das EoL der NFZ zu kontrollieren und weitere Aufbereitung sowie Recycling zu ermöglichen. Die Fahrzeuge werden nicht zurückgenommen, da die Reverse Logistics fehlt und die NFZ-Hersteller kein Wissen über Standort und Zustand der Fahrzeuge haben. Gleichzeitig fehlen hier in Deutschland sowie in den Importländern beim EoL die Infrastruktur und Tools für die EoL-Behandlung einer größeren Anzahl an NFZ.

Die Demontage wird bisher beim Design der Fahrzeuge nicht beachtet. Schrittweise nehmen die Anteile an Sekundärmaterialien in den Fahrzeugen z.B. bei Kunststoff oder durch die CE-Aktivitäten großer Zulieferer zu, die ihre eigenen Produkte nachhaltiger gestalten. In der Fahrzeugentwicklung besteht großes Potenzial, den Einsatz von weiterem recyceltem Material und nachhaltigeren Alternativen zu prüfen und das Design auf verbesserte Demontage, einfache Reparatur und Haltbarkeit auszulegen.

In der Nutzungsphase gibt es bereits verschiedene Vertriebsangebote, wobei sich die Hersteller auf dem Weg vom Verkauf des Produkts zum Verkauf einer vollständigen Lösung befinden. Digitale Services optimieren den Verbrauch, reduzieren die Stillstandszeit und erleichtern das Management der Fahrzeugflotte.

Jede zusätzliche CE-Maßnahmen verbessert die Zirkularität eines Unternehmens, jedoch liegt der CE ein holistischer Ansatz zugrunde, entlang dem der Wandel im gesamten Unternehmen anzugehen ist. Dies umfasst die Unternehmenskultur und die Steigerung des internen wie externen Bewusstseins für CE. Bisher spielt CE nur für Einzelpersonen innerhalb der Unternehmen eine Rolle. Obwohl die Wirtschaftlichkeit weiterhin das ausschlaggebende Entscheidungskriterium sein wird, sollen die Motivation für Maßnahmen nicht mehr primär die finanziellen Einsparungen sondern das Schließen der Kreisläufe und Reduzieren der negativen Umweltwirkungen sein.

Literaturverzeichnis

- [acc-2020] accenture: Winning in a circular economy. Practical steps for the European chemical industry. 2020.
- [ACE-2020] ACEA: End-of-Life Vehicles Directive: potential inclusion of trucks and buses. ACEA Position Paper. 2020.
- [ACE-2021] ACEA: Vehicles in use Europe 2023. January 2023. 2023.
- [Ace-2021] Acerbi, F.; Järnefelt, V.; Martins, J. T.; Saari, L.; Valkokari, K.; Taisch, M.: Developing a Qualitative Maturity Scale for Circularity in Manufacturing. In: Dolgui, A.; Bernard, A.; Lemoine, D.; Cieminski, G. von; Romero, D. (Hrsg.): Advances in Production Management Systems. Artificial Intelligence for Sustainable and Resilient Production Systems. IFIP Advances in Information and Communication Technology. Springer, Nantes, 2021, S. 377–385.
- [ACE-2022] ACEA: The automotive regulatory guide. 2022.
- [Ant-2018] Antikainen, M.; Uusitalo, T.; Kivikytö-Reponen, P.: Digitalisation as an Enabler of Circular Economy. In: Procedia CIRP 73 (2018), S. 45–49.
- [Asf-2021] Asfand, Y. M.: End-of-Life of Heavy Duty Vehicles. School of Industrial Engineering and Management. Masterarbeit. Stockholm: KTH, 2021.
- [BCG-2019] Bosten Consulting Group: The future of commercial vehicles. How new technologies are transforming the industry. 2019.
- [BCG-2020] Bosten Consulting Group: CIRCelligence by BCG. 2020.
- [BCG-2022] Bosten Consulting Group: The Future of Buses and Light Commercial Vehicles Is Electric – With Cost Parity Just Around the Corner. 2022.
- [Beu-2022] Beutnagel, W.: Was treibt die Lkw-Branche an? Batterieantrieb gegen Wasserstoff. Automobil Produktion, 2022. Url: <https://www.automobil-produktion.de/technologie/daimler-truck-setzt-auf-doppelstrategie-208.html> (besucht am 09.05.2022).
- [BGR-2022] Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe: Deutschland – Rohstoffsituation 2021. 2022.
- [BMI-2023] Bundesministerium des Inneren und für Heimat: PESTEL-Methode / PESTLE-Technik / PESTEL-Analyse. Organisationshandbuch. 2023. Url: https://www-orghandbuch.de/OHB/DE/OrganisationshandbuchNEU/4_MethodenUndTechniken/Methoden_A_bis_Z/PESTEL_Methode/PESTEL_Methode_node.html (besucht am 09.05.2023).

- [BMU-2023a] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz: Abfallpolitik. Hintergrund: Entwicklung der Abfallpolitik in Deutschland. 2023. Url: <https://www.bmuv.de/themen/wasser-ressourcen-abfall/kreislaufwirtschaft/abfallpolitik> (besucht am 09. 05. 2023).
- [BMU-2023b] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz: Kreislaufwirtschaftsgesetz. Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen. 2023. Url: <https://www.bmuv.de/gesetz/kreislaufwirtschaftsgesetz> (besucht am 09. 05. 2023).
- [BMV-2015] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur: Bekanntmachung der Richtlinie über die Förderung von leichten und schweren Nutzfahrzeugen mit alternativen, klimaschonenden Antrieben und dazugehöriger Tank- und Ladeinfrastruktur für elektrisch betriebene Nutzfahrzeuge (reine Batterieelektrofahrzeuge, von außen aufladbare Hybridelektrofahrzeuge und Brennstoffzellenfahrzeuge). Berlin, 2021.
- [BMV-2020] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI): Gesamtkonzept klimafreundliche Nutzfahrzeuge. Mit alternativen Antrieben auf dem Weg zur Nullemissionslogistik auf der Straße. Berlin, 2020.
- [Bra-2021] Braun, N.; Hopfensack, L.; Fecke, M.; Wilts, H.: 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). 2021.
- [Bur-2019] Burkert, A.: Elektroantrieb im Nutzfahrzeug. In: MTZ 80 (2019), S. 6–7.
- [Cat-2022a] Cat Reman: INSIDE THE CAT® REMAN PROCESS. The Design of Cat Reman. 2022. Url: https://www.cat.com/en_US/blog/the-design-of-cat-reman.html (besucht am 09. 05. 2023).
- [Cat-2022b] Caterpillar: 2021 Sustainability Report. Caterpillars environmental, social and governance approach. 2022.
- [Cat-2023] CAT: Sustainability. Through Cat® Reman. 2023. Url: https://www.cat.com/en_US/products/new/parts/reman/sustainability.html (besucht am 09. 05. 2023).
- [Cir-2020] Circle Economy: Circular metrics for business. Finding opportunities in the circular economy. 2020.
- [Cir-2022] Circle Economy: The Circularity Gap Report 2022. Amsterdam, 2022.
- [Cir-2023] Circle Economy: The Circularity Gap Report 2023. Amsterdam, 2023.

-
- [Dep-2013] U.S. Department of Energy: WORKSHOP REPORT: Trucks and Heavy-Duty Vehicles Technical Requirements and Gaps for Lightweight and Propulsion Materials. 2013.
- [Deu-2022] Deutscher Bundestag: Klimaschutzbericht 2022. Drucksache 20/3790. Berlin, 2022.
- [DIN-2023] DIN e.V.; DKE; VDI: Deutsche Normungsroadmap Circular Economy. 2023.
- [EEA-2016] European Environment Agency: Circular economy in Europe. Developing the knowledge base. Luxembourg, 2016.
- [Ein-2023] Einride: The world's leading provider of digital, electric and autonomous shipping technology. 2023. Url: <https://www.einride.tech/> (besucht am 09. 05. 2023).
- [Ell-2015] Ellen MacArthur Foundation: Growth Within: a circular economy vision for a competitive Europe. 2015.
- [emo-2021] e-mobil BW GmbH: Systemvergleich zwischen Wasserstoffverbrennungsmotor und Brennstoffzelle im schweren Nutzfahrzeug. Eine technische und ökonomische Analyse zweier Antriebskonzepte. Stuttgart, 2021.
- [Etx-2023] Etxandi-Santolaya, M.; Canals Casals, L.; Montes, T.; Corchero, C.: Are electric vehicle batteries being underused? A review of current practices and sources of circularity. In: Journal of environmental management 338 (2023).
- [EU-2015] Europäische Union: RICHTLINIE (EU) 2015/719 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 29. April 2015 zur Änderung der Richtlinie 96/53/EG des Rates zur Festlegung der höchstzulässigen Abmessungen für bestimmte Straßenfahrzeuge im innerstaatlichen und grenzüberschreitenden Verkehr in der Gemeinschaft sowie zur Festlegung der höchstzulässigen Gewichte im grenzüberschreitenden Verkehr. L 115. 2015.
- [EU-2018a] Europäische Union: Konsolidierter Text: RICHTLINIE 2000/53/EG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 18. September 2000 über Altfahrzeuge. 02000L0053. 2018.
- [EU-2018b] Europäische Union: RICHTLINIE (EU) 2018/849 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 30. Mai 2018 zur Änderung der Richtlinie 2000/53/EG über Altfahrzeuge, der Richtlinie 2006/66/EG über Batterien und Akkumulatoren sowie Altbatterien und Altakkumulatoren sowie der Richtlinie 2012/19/EU über Elektro- und Elektronik-Altgeräte. L 150. 2018.
- [EU-2021] Europäische Union: VERORDNUNG (EU) 2021/1119 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 30. Juni 2021 zur Schaffung des Rahmens für die Verwirklichung der Klimaneutralität und zur Änderung der Verordnungen (EG) Nr. 401/2009 und (EU) 2018/1999 („Europäisches Klimagesetz“). L 243. 2021.

- [Eur-2015] European Commission: Closing the loop - An EU action plan for the Circular Economy. Brussels, 2015.
- [Eur-2018a] European Commission: Measuring progress towards circular economy in the European Union – Key indicators for a monitoring framework. SWD(2018) 17 final. Strasbourg, 2018.
- [Eur-2018b] European Commission: on a monitoring framework for the circular economy. COM(2018) 29 final. Strasbourg, 2018.
- [Eur-2018c] European Commission: Report on Critical Raw Materials and the Circular Economy. 2018.
- [Eur-2019a] Europäische Kommission: Der europäische Grüne Deal. COM(2019) 640 final. Brüssel, 2019.
- [Eur-2019b] European Circular Economy Stakeholder Platform (European Union): Volvo Cars EV battery materials traceability. 2019. Url: <https://circulareconomy.europa.eu/platform/en/-good-practices/volvo-cars-ev-battery-materials-traceability> (besucht am 09. 05. 2023).
- [Eur-2020a] Europäische Kommission: Ein neuer Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft Für ein saubereres und wettbewerbsfähigeres Europa. COM(2020) 98 final. Brüssel, 2020.
- [Eur-2020b] Europäische Kommission: Vorschlag für eine VERORDNUNG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES über Batterien und Altbatterien, zur Aufhebung der Richtlinie 2006/66/EG und zur Änderung der Verordnung (EU) 2019/1020. COM(2020) 798 final. Brüssel, 2020.
- [Eur-2020c] Europäische Kommission: Widerstandsfähigkeit der EU bei kritischen Rohstoffen: Einen Pfad hin zu größerer Sicherheit und Nachhaltigkeit abstecken. COM(2020) 474 final. Brüssel, 2020.
- [Eur-2020d] European Commission: Circular Economy Action Plan. For a cleaner and more competitive Europe. 2020.
- [Eur-2020e] European Commission: Sustainable and Smart Mobility Strategy – putting European transport on track for the future. SWD(2020) 331 final. Brussels, 2020.
- [Eur-2021] European Commission: COMMISSION STAFF WORKING DOCUMENT EVALUATION of Directive (EC) 2000/53 of 18 September 2000 on end-of-life vehicles. SWD(2021) 60 final. Brussels, 2021.
- [Eur-2022] European Commission: Questions and Answers: Sustainable Products Initiative. Brussels, 2022.
- [Eur-2023a] Europäische Kommission: Emissionsfreie LKW und Busse für Klimaneutralität und saubere Luft. 2023.

-
- [Eur-2023b] Europäische Kommission: Kritische Rohstoffe: Sichere und nachhaltige Lieferketten für die grüne und die digitale Zukunft der EU gewährleisten. Pressemitteilung. 2023. Url: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/de/ip_23_1661 (besucht am 09. 05. 2023).
- [Eur-2023c] Eurostat: Inlandgüterverkehr nach Verkehrszweig. 2023. Url: https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/TRAN_HV_FRMOD/default/table?lang=de&category=tran.tran_hv_ms (besucht am 09. 05. 2023).
- [Eur-2023d] Eurostat: Lastkraftwagen und Zugmaschine, nach Alter. 2023. Url: https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/ROAD_EQS_LORROA/default/table?lang=de&category=road.road_eqs (besucht am 09. 05. 2023).
- [Fre-2023] Freepik: Flat design circular economy infographic. 2023. Url: https://www.freepik.com/free-vector/flat-design-circular-economy-infographic_21095209.htm (besucht am 09. 05. 2023).
- [Gar-2019] Garza-Reyes, J. A.; Salomé Valls, A.; Peter Nadeem, S.; Anosike, A.; Kumar, V.: A circularity measurement toolkit for manufacturing SMEs. In: International Journal of Production Research 57.23 (2019), S. 7319–7343.
- [GKV-2023] Gesamtverband Kunststoffverarbeitende Industrie e. V.: Recycelte Kunststoffe in Produkten. Bestimmung, Anforderungen, Rückverfolgbarkeit und Kennzeichnung. Handreichung. Berlin, 2023.
- [Gür-2017] Gürel, E.: SWOT ANALYSIS: A THEORETICAL REVIEW. In: Journal of International Social Research 10.51 (2017), S. 994–1006.
- [hes-2020] hesselmann service: Batteriegesetz: Was sich ab 2023 ändert. 2022. Url: <https://www.batteriegesetz.de/batteriegesetz-was-sich-ab-2023-aendert/> (besucht am 09. 05. 2023).
- [Hoe-2016] Hoepke, E.; Breuer, S. (Hrsg.): Nutzfahrzeugtechnik. Grundlagen, Systeme, Komponenten. Springer, Wiesbaden, 2016.
- [IDI-2016] IDIS: FAQ. All your questions answered in one place. 2016. Url: <https://www.idis2.com/faqs.php> (besucht am 09. 05. 2023).
- [Kra-2018] Kraftfahrt-Bundesamt: Fahrzeugzulassungen (FZ). Bestand an Kraftfahrzeugen nach Umwelt-Merkmalen 1. Januar 2018. Flensburg, 2018.
- [Kra-2021a] Kraftfahrt-Bundesamt: Besitzumschreibungen nach Fahrzeugalter. 2021. Url: https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Besitzumschreibungen/Fahrzeugalter/2021/2021_u_alter_zeitreihen.html?nn=3524810&fromStatistic=3524810&yearFilter=2021&fromStatistic=3524810&yearFilter=2021 (besucht am 09. 05. 2023).
- [Kra-2021b] Kraftfahrt-Bundesamt: Verzeichnis zur Systematisierung von Kraftfahrzeugen und ihren Anhängern, Stand Juli 2021. Flensburg, 2021.

- [Kra-2022a] Kraftfahrt-Bundesamt: Fahrzeugzulassungen (FZ). Bestand an Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern nach Haltern, Wirtschaftszweigen 1. Januar 2022. Flensburg, 2022.
- [Kra-2022b] Kraftfahrt-Bundesamt: Fahrzeugzulassungen (FZ). Bestand an Kraftfahrzeugen nach Umwelt-Merkmalen 1. Januar 2022. Flensburg, 2022.
- [Kra-2022c] Kraftfahrt-Bundesamt: Verkehr in Kilometern - Inländerfahrleistung (VK). Flensburg, 2022.
- [Krü-2022] Krüger, A.: Circular Economy Maturity Models in Manufacturing Companies: A Systematic Literature Review. Semesterarbeit. München: Technische Universität München, 2022.
- [Lac-2020] Lacy, P.; Long, J.; Spindler, W.: The Circular Economy Handbook. Palgrave Macmillan UK, London, 2020.
- [MAN-2020] MAN Truck & Bus: VON UNS GELEAST. DAS PASST. Die Leasingangebote von MAN Financial Services. München, 2020.
- [MAN-2021] MAN Truck & Bus: Lkw-Vermietung: Direkter Vertrieb von MAN Rental Lösungen an Standorten von MAN Truck & Bus Deutschland. Pressemitteilung. München, 2021.
- [MAN-2022a] MAN Truck & Bus: Batterien ressourcenschonend einsetzen und recyceln. 2022. Url: <https://press.mantruckandbus.com/corporate/de/-batterien-ressourcenschonend-einsetzen-und-recyceln/> (besucht am 09. 05. 2023).
- [MAN-2022b] MAN Truck & Bus: Nachhaltigkeitsbericht 2021. 2022.
- [MAN-2022c] MAN Truck & Bus: Recycling ist der Ausgangspunkt für neue Produkte. 2022. Url: <https://www.mantruckandbus.com/de/innovation/recycling-ist-der-ausgangspunkt-fuer-neue-produkte.html> (besucht am 09. 05. 2023).
- [MAN-2023a] MAN Truck & Bus: Digital Maintenance and repair management for your fleet: MAN ServiceCare. 2023. Url: <https://www.man.eu/de/en/service/fleet-management/-maintenance-management/maintenance-management.html> (besucht am 09. 05. 2023).
- [MAN-2023b] MAN Truck & Bus: Good for the environment – and a booming business. 2023. Url: <https://www.mantruckandbus.com/en/innovation/good-for-the-environment-and-a-booming-business.html> (besucht am 09. 05. 2023).
- [MAN-2023c] MAN Truck & Bus: MAN DigitalServices. 2023. Url: <https://rio.cloud/en/marketplace/man-digital-services> (besucht am 09. 05. 2023).
- [MAN-2023d] MAN Truck & Bus: MAN Gebrauchtteilebörse. 2023. Url: <https://www.man.eu/de/de/service/gebrauchtteileboerse-16259.html> (besucht am 09. 05. 2023).
- [MAN-2023e] MAN Truck & Bus: MAN Now – Over-The-Air Upgrades. 2023. Url: <https://rio.cloud/en/marketplace/man-digital-services/man-now> (besucht am 09. 05. 2023).

-
- [MAN-2023f] MAN Truck & Bus: MAN TopUsed - Used Trucks, Buses, Vans and Trailers. 2023. Url: <https://www.man.eu/topused/de/en/homepage.html> (besucht am 09. 05. 2023).
- [MAN-2023g] MAN Truck & Bus: Vehicle Purchasing. 2023. Url: <https://www.man.eu/top-used/de/en/our-man-topused-services/man-topused-vehicle-purchasing/vehicle-purchasing.html> (besucht am 09. 05. 2023).
- [MAN-2023h] MAN Truck & Bus: Welcome to MAN TopUsed. 2023. Url: <https://www.man.eu/topused/de/en/about-man-topused/about-man-topused.html> (besucht am 09. 05. 2023).
- [Mat-2018] Material Economics: The Circular Economy - A Powerful Force for Climate Mitigation. Stockholm, 2018.
- [Mis-2015] Misoch, S.: Qualitative Interviews. Walter de Gruyter GmbH, Berlin, München und Boston, 2015.
- [Mon-2022] Montes, T.; Etxandi-Santolaya, M.; Eichman, J.; Ferreira, V. J.; Trilla, L.; Corchero, C.: Procedure for Assessing the Suitability of Battery Second Life Applications after EV First Life. In: Batteries 8.9 (2022), S. 122.
- [Nat-2021] Nationale Plattform Zukunft der Mobilität: Ladeinfrastruktur für batterieelektrische LKW. Hrsg. von Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur. 2021.
- [Nor-2021] Nordic Innovation; SITRA; accenture: The Circular Economy Playbook. Circular business models for Nordic manufacturing industries. Oslo, 2021.
- [Pal-2020] Palm, K. J.: An Evaluation of Sustainable Designs for Trucks. - a life cycle analysis. School of Industrial Engineering and Management. Masterarbeit. Stockholm: KTH, 2020.
- [Pap-2023] Lena Papasabbas: Der wichtigste Megatrend unserer Zeit. 2023. Url: <https://www.zukunftsinstitut.de/artikel/der-wichtigste-megatrend-unserer-zeit/> (besucht am 09. 05. 2023).
- [Pot-2016] Potting, J.; Hekkert, M.; Worrell, E.; Hanemaaijer, A.: Circular Economy: Measuring innovation in product chains. Hrsg. von PBL Netherlands Environmental Assessment Agency. The Hague, 2016.
- [Pro-2020] Prognos AG: Statusbericht der deutschen Kreislaufwirtschaft 2020. 2020.
- [pwc-2019] pwc: The road to circularity. Why a circular economy is becoming the new normal. 2019.
- [Ren-2020] Renault Group: Refactory: The Flins Site Enters The Circle Of The Circular Economy. 2020. Url: <https://www.renaultgroup.com/en/news-on-air/news/refactory-the-flins-site-enters-the-circle-of-the-circular-economy/> (besucht am 09. 05. 2023).

- [Ren-2021] Renschler, A.: Die Zukunft des Nutzfahrzeugs in Zeiten der Transformation. Analyse von Herausforderungen und Erfolgsfaktoren. Springer, Berlin, Heidelberg, 2021.
- [Ren-2022a] Renault Group: Refactory of Flins. 2022.
- [Ren-2022b] Renault Group: The Future Is NEUTRAL: The circular economy is stepping into a new era! Pressemitteilung. Boulogne-Billancourt, 2022.
- [Rol-2018a] Roland Berger: Shifting up a gear. Automation, electrification and digitalization in the trucking industry. München, 2018.
- [Rol-2018b] Roland Berger: Trends in the truck & trailer market. Market study. München, 2018.
- [Sai-2018] Michael Saidani: Monitoring and advancing the circular economy transition – Circularity indicators and tools applied to the heavy vehicle industry. Dissertation. Paris: Université Paris-Saclay, 2018.
- [San-2017] Sandberg, B.: Wissenschaftliches Arbeiten von Abbildung bis Zitat. Lehr- und Übungsbuch für Bachelor, Master und Promotion. 3. Auflage. De Gruyter Studium. De Gruyter Oldenbourg, München, Wien, 2017.
- [Sca-2021] Scania: Technical Information Library. Dismantling Information. 2021. Url: https://til.scania.com/idcplg?IdcService=GET_DOC_PAGE&Action=GetTemplatePage&Page=STANDARD_QUERY_PAGE&tilProduct=DIS&dpTriggerValue=DIS&funcNum=01&sb=1&idcGlobalVariable=5200020201080800010000 (besucht am 09. 05. 2023).
- [Sca-2023] Scania: Connected Vehicles. 2023. Url: <https://www.scania.com/group/en/home/about-scania/scania-in-brief/how-we-create-value/connected-vehicles.html> (besucht am 09. 05. 2023).
- [Sei-2022] Seidel, M.: Circular Economy in der Automobilindustrie – Die Perspektive eines OEMs. In: Mayer, R. (Hrsg.): XXXIX. Internationales Symposium 2022 Bremsen-Fachtagung. Proceedings. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2022, S. 84–86.
- [She-2016] Shell Deutschland Oil GmbH: Diesel oder alternative Antriebe - Womit fahren LKW und Bus morgen? Fakten, Trends und Perspektiven bis 2040. Hamburg, 2016.
- [Soo-2021] Soo, V. K.; Doolan, M.; Compston, P.; Duflou, J. R.; Peeters, J.; Umeda, Y.: The influence of end-of-life regulation on vehicle material circularity: A comparison of Europe, Japan, Australia and the US. In: Resources, Conservation and Recycling 168 (2021).

-
- [Sta-2023] Statistisches Bundesamt (Destatis): Zusammenhang zwischen Lkw-Fahrleistungen und Industrieproduktion. 2023. Url: <https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Industrie-Verarbeitendes-Gewerbe/fahrleistungsindex.html> (besucht am 09. 05. 2023).
- [Sti-2021] Stiftung Familienunternehmen: Circular Economy in Familienunternehmen. Herausforderungen, Lösungsansätze und Handlungsempfehlungen. München, 2021.
- [Tam-2019] Tam, E.; Soulliere, K.; Sawyer-Beaulieu, S.: Managing complex products to support the circular economy. In: Resources, Conservation and Recycling 145.1 (2019), S. 124–125.
- [Tam-2020] Tambovceva, T.; Titko, J.: Introduction to circular economy. Hrsg. von Ekonomikas un kultūras augstskola. Riga, 2020.
- [Tra-2017] Transport & Environment: Roadmap to climate-friendly land freight and buses in Europe. Brüssel, 2017.
- [Umw-2021] Umweltbundesamt: Schwere Nutzfahrzeuge. 2021. Url: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/verkehr/emissionsstandards/schwere-nutzfahrzeuge> (besucht am 09. 05. 2023).
- [Umw-2022a] Umweltbundesamt: Car-Sharing. 2022. Url: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/verkehr/nachhaltige-mobilitaet/car-sharing#angebotsformen-des-car-sharing> (besucht am 09. 05. 2023).
- [Umw-2022b] Umweltbundesamt: Die Ökobilanz von schweren Nutzfahrzeugen und Bussen. Bewertung ausgesuchter Anwendungsfälle alternativer Antriebskonzepte hinsichtlich Reduktionspotential von CO₂-Emissionen von Energieverbrauch. Wien, 2022.
- [Umw-2022c] Umweltbundesamt: Erdüberlastungstag: Ressourcen für 2022 verbraucht. 2022. Url: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/erdueberlastungstag-ressourcen-fuer-2022-verbraucht> (besucht am 09. 05. 2023).
- [UN-2022] United Nations: The Sustainable Development Goals Report. 2022.
- [UNE-2022] UNITED NATIONS ECONOMIC COMMISSION FOR EUROPE (UNECE): Sager And Cleaner Used Vehicles For Africa. WP.29-187-17. 2022.
- [Unt-2023] UnternehmerTUM: Landkarte 2023: Start-ups treiben die Circular Economy voran. 2023. Url: <https://www.unternehmertum.de/themen/nachhaltigkeit/landkarte-2023-start-ups-treiben-circular-economy-voran> (besucht am 09. 05. 2023).
- [VDA-2022a] Verband der Automobilindustrie: Batterie, Wasserstoff oder Electrofuels? Nutzfahrzeuge. 2022. Url: <https://www.vda.de/de/themen/automobilindustrie/-nutzfahrzeuge/antriebsstrategie-nutzfahrzeuge> (besucht am 09. 05. 2022).

- [VDA-2022b] Verband der Automobilindustrie: Jahresbericht 2022. Themen und Zahlen zur Entwicklung der deutschen Automobilindustrie. Berlin, 2022.
- [Vol-2020] Volvo Trucks: Volvo Trucks verkauft ab 2021 komplette Modellpalette elektrisch angetriebener Lkw auf dem europäischen Markt. Pressemitteilung. 2020. Url: <https://www.volvogroup.com/de/news-and-media/news/2020/nov/news-3820395.html> (besucht am 09. 05. 2023).
- [Vol-2022a] Volkswagen Group: TRATON GROUP, Daimler Truck und Volvo Group geben Startschuss für Joint-Venture für europäisches Hochleistungs-Ladenetz. Pressemitteilung. 2022. Url: <https://www.volkswagenag.com/de/news/2022/07/the-traton-group-daimler-truck-and-the-volvo-group-kick-off-eur.html#> (besucht am 09. 05. 2023).
- [Vol-2022b] Volvo Trucks: World-first: Volvo delivers electric trucks with fossil-free steel to customers. Pressemitteilung. 2022. Url: <https://www.volvotrucks.com/en-en/news-stories/press-releases/2022/nov/world-first-volvo-delivers-electric-trucks-with-fossil-free-steel-to-customers.html> (besucht am 09. 05. 2023).
- [Vol-2023a] Volta Trucks: Truck as a Service. Accelerate. De-risk. Simplify. 2023. Url: <https://voltatrucks.com/truck-as-a-service> (besucht am 09. 05. 2023).
- [Vol-2023b] Volvo Trucks: Uptime Care. Höhere Fahrzeugverfügbarkeit durch intelligente Vernetzung. 2023. Url: <https://www.volvotrucks.de/de-de/services/vehicle-service/uptime-care.html> (besucht am 09. 05. 2023).
- [Vol-2023c] Volvo Trucks: Volvo Serviceverträge. 2023. Url: <https://www.volvotrucks.de/de-de/services/vehicle-service/service-contracts.html> (besucht am 09. 05. 2023).

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1	Aufbau der Semesterarbeit (eigene Darstellung)	2
Abbildung 2-1	Nutzfahrzeugklassen und Typen [She-2016, S. 21]	4
Abbildung 2-2	Zeichnung eines LKW mit Beschriftung der wichtigsten Komponenten (eigene Darstellung) [Hoe-2016, S. 211; Rol-2018b, S. 34]	6
Abbildung 2-3	Modellreihe elektrischer LKW von Volvo Trucks [Vol-2020]	6
Abbildung 2-4	Butterfly-Diagramm der Ellen MacArthur Foundation [Eil-2015, S. 24]	12
Abbildung 2-5	CE-Strategien des 9R-Modells (eigene Darstellung nach [Pot-2016; DIN-2023])	13
Abbildung 2-6	Ausgewählte Richtlinien und Verordnungen der EU (eigene Darstel- lung) [Sai-2018, S. 36; ACE-2022, S. 15ff]	16
Abbildung 2-7	Ausgewählte Richtlinien und Verordnungen der EU geltend für Fahr- zeuge (eigene Darstellung) [Sai-2018, S. 36; ACE-2022, S. 15ff]	16
Abbildung 2-8	Wertschöpfungskette in der Kreislaufwirtschaft (eigene Darstellung nach [Fre-2023])	20
Abbildung 2-9	Produktlebensweg und Prozessschritte beim Remanufacturing bei Caterpillar [Cat-2023]	25
Abbildung 2-10	Abfallpyramide (eigene Darstellung nach [BMU-2023a])	28
Abbildung 3-1	SWOT-Analyse (eigene Darstellung nach [Gür-2017])	32
Abbildung 4-1	Ist-Situation der CE im NFZ-Sektor entlang der Wertschöpfungskette (eigene Darstellung)	35
Abbildung 4-2	Herausforderungen für die CE im NFZ-Sektor (eigene Darstellung) .	41
Abbildung 4-3	Treiber der CE im NFZ-Sektor (eigene Darstellung)	45
Abbildung 4-4	Kurzfristige, mittelfristige und langfristige potenzielle Maßnahmen der CE im NFZ-Sektor entlang der Wertschöpfungskette (eigene Darstellung)	49

A Anhang A

Liste der Interviewpartner:

Nummer	Expertise bzw. Position	Sektor
E1	CE-Berater und NFZ-Experte	Consulting
E2	Circular Business Expert	NFZ-OEM
E3	Director Environment and Innovation	NFZ-OEM
E4	Partnerin, Fokus auf CE und Nachhaltigkeit	Consulting
E5	Umweltexperte für Produkte	NFZ-OEM
E6	Technische Beratung Kunststoffanwendungen	NFZ-OEM
E7	Gebrauchteilebörse	NFZ-OEM
E8	Recycling Expertin HV-Batterien	NFZ-OEM
E9	Experten Remanufacturing (Gruppeninterview)	NFZ-OEM
E10	Umweltbeauftragte; Head of Division External Affairs Technical Regulation (Gruppeninterview)	NFZ-OEM
E11	Berater Dekarbonisierung	NFZ-OEM
E12	Projektleiter Vorentwicklung	NFZ-OEM

B Anhang B

Leitfaden für die Durchführung der Interviews:

Die Fragen im Leitfaden sind nicht final ausformuliert, da sie je nach Gesprächsverlauf in jedem Interview anders gestellt wurden. In keinem Interview wurden alle Fragen eines Abschnitts gefragt, sondern die Fragen entsprechend der vorhergegangenen Antworten ausgewählt. Die Fragen dienen der Strukturierung des Interviews und der Gedankenstütze, welche Themen angesprochen werden können.

- 1) **Informations- und Einstiegsphase**
 - Danke für die Interviewbereitschaft
 - Eigene Vorstellung und Information über Studienarbeit zu CE in NFZ-Sektor
 - Vorstellung des Experten (Name, Rolle)
 - Erlaubnis für Interviewaufzeichnung und Angabe als Interviewpartner
 - Einstiegsfrage: Was bedeutet CE für Sie / Was ist Ihr Bezug zur CE?

- 2) **Allgemeiner Einstieg in den NFZ-Sektor**
 - Welche Trends beeinflussen aktuell die NFZ-Industrie?
 - Was sind die Charakteristika der NFZ-Industrie (z.B. Akteure im Markt, Offenheit für Neues)?
 - Wie sind die typischen Lebenswege von NFZ?
 - Was passiert mit den NFZ am EoL?

- 3) **Status Quo der CE im NFZ-Sektor**
 - Welche Rolle spielt Nachhaltigkeit und speziell CE in der NFZ-Industrie?
 - Was sind die wichtigsten Treiber / Motivation für die CE in der NFZ-Industrie?
 - Welche Chancen und Risiken bietet die CE für die NFZ-Industrie?
 - Welche Herausforderungen erschweren die CE in der NFZ-Industrie?

- 4) **Rolle von CE und Nachhaltigkeit im Unternehmen**
 - Welche Rolle spielt Nachhaltigkeit im Unternehmen? Welche Rolle spielt die CE?
 - Welche Nachhaltigkeitsstrategie wird verfolgt? Welche CE-Strategie?
 - Welche Nachhaltigkeitsmaßnahmen wurden bisher umgesetzt? Welche sind noch geplant?

- 5) **Bisherige CE-Aktivitäten im Unternehmen**
 - Welche CE-Maßnahmen wurden bisher umgesetzt?
 - Warum diese zuerst?

- Wie erfolgreich ist die Umsetzung?
 - Welche Indikatoren / KPIs werden verwendet? Welche Daten werden erfasst?
 - Werden Nebeneffekte / Umweltwirkungen werden kontrolliert?
 - Wie können die Maßnahmen erfolgreicher werden (Erfolgsfaktoren)?
- 6) **Detail einer aktuellen CE-Maßnahme im Unternehmen**
- Was sind die wichtigsten Inhalte dieser Maßnahme?
 - Was sind die Ziele (CE als Motivation)?
 - Wer treibt die Maßnahme voran?
 - Welche (Erfolgs-)Faktoren spielen bei der Umsetzung eine Rolle?
 - Wie werden die Fortschritte der umgesetzten Maßnahme gemessen?
 - Welchen Einfluss hat die Maßnahme?
- 7) **Potenziale und zukünftige CE-Aktivitäten im Unternehmen**
- Wo liegen die größten Ineffizienzen (z.B. Umweltwirkungen, nicht nachhaltige direkte und indirekte Ressourcen, Schadstoffe, Abfälle, Lebensdauern, Recycling)?
 - Wo liegen demnach die größten Verbesserungspotenziale?
 - Welche CE-Maßnahmen sind geplant?
- 8) **Potenziale für CE und Best Practices anderer Industrien**
- Welche erfolgreichen CE-Maßnahmen haben andere Unternehmen im NFZ-Sektor umgesetzt?
 - Welche erfolgreichen CE-Maßnahmen sind Ihnen aus anderen Sektoren bekannt?
 - Wie könnten sich diese Maßnahmen auf den NFZ-Sektor übertragen lassen?
- 9) **Ausblick für den NFZ-Sektor**
- Was würden Sie tun, wenn Sie von einer grünen Wiese starten könnten / mit Zauberhand Dinge verändern könnten, um die Industrie zirkulär zu gestalten?
 - Was wünschen Sie sich, um die CE im NFZ-Sektor weiter vorantreiben zu können (politische Maßnahmen, unternehmensinterne Förderung, Technologien etc.)?
 - Wo sehen Sie den Nutzfahrzeugsektor in 5 / 10 Jahren?
- 10) **Abschlussphase**
- Mit wem sollte ich noch sprechen? Haben Sie einen Kontakt?
 - Was sollte ich andere Interviewteilnehmer fragen, was für Sie besonders interessant wäre?
 - Habe ich etwas nicht gefragt, was Sie erwartet hätten / mir mitteilen möchten?
 - Vielen Dank und Abschied

Erklärung

Ich versichere hiermit, dass ich die von mir eingereichte Semesterarbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.

A black rectangular redaction box covering the signature of the author.

München, 30.05.2023