



Datenkompetenzzentrum für Circular Economy Daten

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung



Finanziert von der
Europäischen Union
NextGenerationEU

Verfasser:

MS 3.2 Bewertungsrahmen

Dissemination Level	PU (Public)
Abgabedatum	30.06.2025, Ergänzung 06.08.2026
Autoren	Verantwortung: Annalisa, Nolte (ANTS) Mitarbeit: • Juliano Bezerra de Araujo • Monika Dittrich • Lara Baumanns • Andre Bröcker • Milad Goudarzi





Abstract

Das Deliverable des Bewertungsrahmens wurde innerhalb des Forschungsprojekts DACE erarbeitet und verfolgt das Ziel, eine wissenschaftlich fundierte und zugleich praxisnahe Grundlage zu entwickeln, mit der die Zirkularität von Produkten, Unternehmen und Wirtschaftssystemen konsistent und vergleichbar bewertet werden kann. Der Bewertungsrahmen erstreckt sich über verschiedene Systemebenen (Nano-, Mikro-, Meso-, Makroebene). Dabei wird für jede dieser Untersuchungsebenen spezifische Indikatorensets zusammengestellt und eine Methodik zur Berechnung der Kennzahlen mit Bezug zur Circular Economy (CE) beschrieben.

Die Erarbeitung basiert auf einer umfassenden Analyse bestehender Bewertungsansätze sowie der Ableitung eines normativen Zielbilds zirkulärer Systeme. Die so identifizierten und systematisierten Indikatoren wurden in ein konsistentes Portfolio überführt, das durch ein praxisorientiertes Bewertungsraster ergänzt wird. Dies ermöglicht eine strukturierte Anwendung in verschiedenen betrieblichen und institutionellen Kontexten. Darüber hinaus wurde ein Umsetzungsplan erstellt, der die Implementierung des Bewertungsrahmens, die Interpretation der Ergebnisse und die Ableitung geeigneter Maßnahmen unterstützt.

Die Anwendung des Bewertungsrahmens wurde exemplarisch anhand einer Fallstudie zum Produktsystem „Spülmittelkonzentrat“ demonstriert. Diese zeigt auf, wie verschiedene Verpackungsdesigns, deren Wiederverwendung und Rezyklatanteile ökologische Vorteile erzielen können. Zeitgleich werden die Potenziale durch die Anwendung zentraler R-Strategien wie Refuse, Reduce, Reuse und Recycle aufgezeigt. Die Fallstudie verdeutlicht die Bedeutung einer konsequenten Methodenanwendung für die belastbare Bewertung zirkulärer Systeme. Insgesamt liefert das Deliverable des Bewertungsrahmens einen Beitrag zur Operationalisierung und Weiterentwicklung von Bewertungsansätzen innerhalb der CE und unterstützt Unternehmen, Institutionen und politische Beteiligte bei der Gestaltung ressourcenschonender und zirkulärer Wertschöpfungsprozesse.



Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	9
2	Grundlegende Konzepte und Umsetzungsstrategien der Kreislaufwirtschaft	11
3	Kreislaufwirtschaftsbewertung auf Nanoebene	14
3.1	Die entscheidende Rolle der Messung der Zirkularität in der Unternehmenspraxis ..	14
3.2	Stand der Forschung zur Kreislaufwirtschaftsbewertung auf Produktebene	15
3.3	Ökobilanzierung als Komponente der Nachhaltigkeits- und Kreislaufwirtschaftsbewertung von Produkten	17
3.3.1	Methodische Herausforderungen bei der Durchführung von LCA im Kontext von CE	17
3.3.2	Untersuchte Produktsysteme im Rahmen der Fallstudie „Spülmittelkonzentrat“	22
3.3.3	Durchführung einer LCA im Kontext von CE an der Fallstudie „Spülmittelkonzentrat“	25
3.3.4	Ergebnisse und Diskussion der LCA der Fallstudie Spülmittelkonzentrat	30
3.4	Zirkularitätsbewertung als Komponente der Kreislaufwirtschaftsbewertung von Produkten	38
3.4.1	Stand der Forschung zur Zirkularitätsbewertung von Produkten	38
3.4.2	Durchführung einer Zirkularitätsbewertung anhand der Fallstudie „Spülmittelkonzentrat“	44
3.4.3	Ergebnisse der Zirkularitätsbewertung der Fallstudie Spülmittelkonzentrat	44
3.5	Zusammenführung der Ergebnisse der Kreislaufwirtschaftsbewertung der Fallstudie Spülmittelkonzentrat	49
4	Kreislaufwirtschaftsbewertung auf Mikroebene	51
4.1	Ansätze zur Messung der Zirkularität auf Mikroebene	51
4.2	Bewertung der Unternehmensleistung in der Zirkularität: Theorie im Vergleich zur Praxis	54
4.3	Ein integriertes Rahmenwerk zur Bewertung der Zirkularität auf Mikro-Ebene	56
4.4	Umsetzung des Bewertungsrahmens in einer sektorspezifischen Fallstudie	61
4.4.1	Aktueller Stand der Leistungsbewertung der Kreislaufwirtschaft im Kunststoff-Teilsektor	61
4.4.2	Empfohlene Indikatoren der Kreislaufwirtschaft zur Erfassung und Überwachung	64
4.4.3	Abschließende Bemerkungen	66
5	Kreislaufwirtschaftsbewertung auf Mesoebene	67
5.1	Methodisches Vorgehen	67



5.2	Bestehende Ansätze zur Messung der Kreislaufwirtschaft auf der Mesoebene	67
5.3	Framework zur Leistungsmessung der Kreislaufwirtschaft auf der Mesoebene	68
6	Kreislaufwirtschaftsbewertung auf Makroebene	73
6.1	Entwicklung der Kreislaufwirtschaft	73
6.1.1	Gesetzliche Grundlagen	73
6.1.2	Die Nationale Kreislaufwirtschaftsstrategie (NKWS)	75
6.2	Bewertungsrahmen	78
6.2.1	Grundlagen für den Bewertungsrahmen: Die Umweltökonomischen Gesamtrechnungen	78
6.2.2	Aktuelle gesamtwirtschaftliche Indikatoren für die Kreislaufwirtschaft in Deutschland	84
6.2.3	Bewertungsrahmen auf EU-Ebene	87
6.2.4	Lücken der makro-ökonomischen Indikatoren zur Messung der Kreislaufwirtschaft	89
6.3	Empfehlungen zur Weiterentwicklung der Indikatoren	91
7	Zusammenfassung	92
8	Anlagen und referenzierte Dokumente	94
9	Anhang	95
9.1	Anhang A	95
9.2	Anhang B	98
9.3	Anhang C	99
9.4	Anhang D	100
9.5	Anhang E	101
10	Literaturverzeichnis	104



Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

Abbildung 1: Grundprinzipien der Kreislaufwirtschaft im übergeordneten Kontext (EMF, 2013; ISO, 2024b; Kristensen & Mosgaard, 2020; Webster, 2017)	12
Abbildung 2: Strategien der Kreislaufwirtschaft – Eine makroökonomische Perspektive und die Unterteilung in zehn verschiedene Typen (Bocken et al., 2016; Potting et al., 2017)	13
Abbildung 3: Umwelteinflüsse nach der Cut-Off Methode über die Lebenszyklusphasen Herstellung, Nutzung und End-of-Life/Recycling (Suski & Wiesen, 2016) nach (Frischknecht, 2010)	18
Abbildung 4: Umwelteinflüsse nach der Avoided-Burden-Methode über die Lebenszyklusphasen Herstellung, Nutzung und End-of-Life (Recycling) inkl. Gutschriftenvergabe (Suski & Wiesen, 2016)	18
Abbildung 5: Schematische Darstellung des Produktsystems des konventionellen Spülmittels (eigene Darstellung, Produktbilderquelle: www.pril.de)	24
Abbildung 6: Schematische Darstellung des Produktsystems des Spülmittelkonzentrats (eigene Darstellung, Produktbilderquelle: www.pril.de)	24
Abbildung 7: Systemgrenzen des untersuchten Produkts „konventionelle Spülmittelflasche“	27
Abbildung 8: Systemgrenzen des untersuchten Produkts „Spülmittelkonzentrat“	28
Abbildung 9: Vergleich der skalierten Umweltauswirkungen der Referenzproduktsysteme (gesamt)	31
Abbildung 10: Prozentuale Beiträge der Lebenszyklusphasen zu den Umweltauswirkungen des gesamten Produktsystems des konventionellen Spülmittels	32
Abbildung 11: Vergleich der skalierten Umweltauswirkungen der Referenzproduktsysteme (nur Verpackungen betrachtet)	33
Abbildung 12: Prozentuale Beiträge der Lebenszyklusphasen zu den Umweltauswirkungen der Spülmittelflasche	34
Abbildung 13: Szenarioanalyse für verschiedene durchschnittliche Wiederverwendungszyklen (n) bzw. -bereitschaften der Nutzer	35
Abbildung 14: Sensitivitätsanalyse des Rezyklatgehalts der Spülmittelflasche	36
Abbildung 15: Sensitivitätsanalyse der Transportdistanzen für das konventionelle Spülmittel	37
Abbildung 16: Berücksichtigte Materialflüsse für die Berechnung des MCI (EMF & Granta, 2019)	41
Abbildung 17: MCI-Ergebnisse aller untersuchten Szenarien zusammengefasst	48
Abbildung 18: MCI und skalierte CO ₂ - und Kupfer-Äquivalente der untersuchten Produktverpackungen	50
Abbildung 19: Häufigkeit der Nutzung von Daten zur zirkulären Wirtschaft gemäß den R-Strategien (Araujo et al., 2025)	55



Abbildung 20: Häufigkeit der Nutzung von Kreislaufwirtschaftsdaten entsprechend den Lebenszyklusphasen (Araujo et al., 2025)	55
Abbildung 21: Häufigkeit der Nutzung von Daten zur Kreislaufwirtschaft nach technologischer oder sozio-institutioneller Klassifikation (Araujo et al., 2025)	56
Abbildung 22: Auswahlprozess der Leistungsindikatoren	57
Abbildung 23: Anfangsabschnitt mit einer Einführung in das Instrument und dessen Inhalte	58
Abbildung 24: Verteilung der Indikatoren der Kreislaufwirtschaft nach Stufen der Wertschöpfungskette	59
Abbildung 25: Verteilung der CE-Indikatoren nach Wertschöpfungsstufen	59
Abbildung 26: Hauptblatt mit Indikatoren zur Kreislaufwirtschaft, dargestellt in einem Format, das eine einfachere Filterung nach den Schlüsselmerkmalen ermöglicht	60
Abbildung 27: Von den analysierten Unternehmen im Kunststoff-Teilsektor überwachte Indikatoren der Kreislaufwirtschaft	62
Abbildung 28: Häufigkeit der Messung der Leistung der Kreislaufwirtschaft über die Wertschöpfungsstufen bei den untersuchten Unternehmen.....	63
Abbildung 29: Häufigkeit der Leistungsmessung in Bezug auf Kreislaufwirtschaftsstrategien bei den untersuchten Unternehmen.....	64
Abbildung 30: Vorgeschlagene Indikatoren, die für die Fallstudie relevant sind, aber nicht berichtet wurden	65
Abbildung 31: Konzeptioneller Geltungsbereich der Leistungsmessung der Kreislaufwirtschaft auf der Mesoebene	69
Abbildung 32: Referenzrahmen für Indikatoren der Leistungsmessung der Kreislaufwirtschaft auf der Mesoebene	70
Abbildung 33: Kompakte Ansicht der Referenzliste für Indikatoren der Leistungsmessung der Kreislaufwirtschaft auf der Mesoebene	71
Abbildung 34: Vollständige Datenbank der Indikatoren der Leistungsmessung der Kreislaufwirtschaft auf der Mesoebene	72
Abbildung 35: Aufbau der UGR und Beziehungen zwischen den Konten (Statistisches Bundesamt, 2025d)	79
Abbildung 36: Excel-Tool und Auswahlkriterien für CE-Indikatoren für das Fallbeispiel Spülmittelkonzentrat (Saidani et al., 2019)	99
Tabelle 1: Positive und negative Aspekte der Allokationsansätze und ihre Fähigkeit, einen Beitrag zur Kreislaufwirtschaft zu vgl. (Obrecht et al., 2022).....	20
Tabelle 2: Auswahlkriterien für die Zuteilungsmethode (Azuaje et al., 2025); (Bergsma & Sevenster, 2013)).....	21
Tabelle 3: Beschreibungen der R-Strategien innerhalb der Fallstudie.....	23
Tabelle 4: Übersicht aller Parametervariationen im Rahmen der Szenario- und Sensitivitätsanalyse.....	30



Tabelle 5: Unterschiede zwischen der Berechnung des MCIs und des PCIs (Bracquené et al., 2020; EMF & Granta, 2019)	42
Tabelle 6: Allgemeine Vor- und Nachteile der Zirkularitätsindikatoren MCI und PCI	43
Tabelle 7: Inputparameter für die MCI-Berechnung der beiden untersuchten Produkte (bzw. deren Verpackungen) für die Funktionelle Einheit von 180 gewaschenen Gedecken	45
Tabelle 8: Variablen und Endergebnisse für die MCI-Berechnung der beiden untersuchten Produkte (bzw. deren Verpackungen)	46
Tabelle 9: Inputparameter, Variablen, Endergebnisse der MCI-Berechnung für die Produktkombination für die FU von 180 gewaschenen PS (ein Nachfüllvorgang)	47
Tabelle 10: Liste der konsultierten Referenztypen und Beschreibung ihrer Hauptmerkmale Legende: (1) Indikatoren, die spezifisch für verschiedene CE-Strategien sind; (2) Indikatoren, nach Wertschöpfungskettenstufen aufgeschlüsselt; (3) Einbeziehung sozio-institutioneller Indikatoren; (4) Einbeziehung von Indikatoren zu biologischen Kreisläufen; (5) Einschluss zusammengesetzter Indikatoren, Verhältniszahlen oder Indizes; (6) Einschluss finanzieller Daten; (7) universell sowie branchenspezifisch; * Sammlung unternehmensspezifischer Indikatoren zur Zirkularitätsleistung.....	53
Tabelle 11: Übersicht über Inhalte im Tabellenblatt Entnahme (eigene Zusammenstellung auf der Basis von Statistisches Bundesamt (2025d))	80
Tabelle 12: Übersicht über Inhalte im Tabellenblatt Abgaben an die Umwelt (eigene Zusammenstellung auf der Basis von Statistisches Bundesamt (2025d)	81
Tabelle 13: Übergeordnete Indikatoren der NKWS und ihr Bezug zu R-Strategien.....	87
Tabelle 14: Europäische CE-Überwachungsrahmen mit Bezug zu den R-Strategien (eigene Zusammenstellung auf Basis von Eurostat)	89
Tabelle 15: Referenzierte Dokumente	94
Tabelle 16: Übersicht einiger CE-Indikatoren geordnet nach bewertbaren R-Strategien	95
Tabelle 17: Auflistung verwandter Studien und der verwendeten Allokationsmethoden	98
Tabelle 18: Übersicht einiger CE und Zirkularitätsbewertungen im Kunststoff und Verpackungssektor	100
Tabelle 19: Inputparamete, Variablen, Endergebnisse der MCI-Berechnung für die Produktkombination für die Funktionelle Einheit von 180 gewaschenen PS (fünf Nachfüllvorgänge)	101
Tabelle 20: Inputparamete, Variablen, Endergebnisse der MCI-Berechnung der Spülmittelflasche mit verschiedenen Rezyklatanteilen (50 % und 100 %) für die Funktionelle Einheit von 180 gewaschenen PS (fünf Nachfüllvorgänge)	102



1 Einleitung

Der Übergang von einem linearen zu einem zirkulären Wirtschaftsmodell stellt einen zentralen Hebel für die Reduktion von Ressourcenverbrauch, Emissionen und Umweltbelastungen dar. Gleichzeitig entstehen neue Herausforderungen in der Operationalisierung und Bewertung zirkulärer Maßnahmen. Um eine evidenzbasierte Transformation zur Circular Economy (CE) zu unterstützen, bedarf es valider und anwendungsorientierter Bewertungsansätze, die die Kreislauffähigkeit unterschiedlicher Systeme, Produkte und Organisationen systematisch erfassen. Ein zentrales Konzept im Kontext der CE bilden gemäß (Potting et al., 2017) die sogenannten R-Strategien. Sie dienen als operative Leitlinien zur Umsetzung zirkulärer Prinzipien und sind damit auch ein wesentlicher Bezugspunkt für die Entwicklung geeigneter Bewertungsansätze.

Die Umsetzung der CE basiert zugleich auf grundlegenden Prinzipien, die eine langfristige Nutzung von Ressourcen, die Vermeidung von Abfällen und die Schaffung von Mehrwert für verschiedene Akteure ermöglichen. Die Prinzipien wie systemisches Denken, verantwortungsvolles Ressourcenmanagement, Design für Recycling und Rückverfolgbarkeit bilden den normativen Rahmen für eine zirkuläre Wirtschaftsweise. Ihre Operationalisierung stellt jedoch eine methodische Herausforderung dar, weshalb eine strukturierte Übersetzung in konkrete Strategien erforderlich ist. In der Literatur haben sich insbesondere die Strategien der Verengung (Narrowing Resource Loops), Verlangsamung (Slowing Resource Loops) und Schließung (Closing Resource Loops) etabliert (Bocken et al., 2016). Diese zielen auf eine effizientere Ressourcennutzung, verlängerte Produktlebensdauern und geschlossene Stoffkreisläufe ab. Sie bilden die Grundlage für die in diesem Dokument entwickelten Bewertungsansätze. Zudem gibt es verschiedene Ebenen, auf denen die Leistung der zirkulären Wirtschaft gemessen werden kann. Laut (Saidani et al., 2017) werden diese Ebenen wie folgt kategorisiert:

- die Nano-Ebene mit Fokus auf der Produktebene,
- die Mikro-Ebene mit Schwerpunkt auf der Unternehmensebene, die Mesoebene, die Netzwerke von Unternehmen oder Industrieparks betrachtet, und
- die Makro-Ebene, die sich mit größeren Maßstäben wie Städten oder Regionen befasst.

Die Entwicklung eines standardisierten Indikatorensets, welches alle Ebenen adressiert und gleichzeitig den sektoralen sowie kontextuellen Besonderheiten Rechnung trägt, stellt eine erhebliche Herausforderung dar. Dies ist vor allem darauf zurückzuführen, dass Unternehmen, Produkte und Systeme sehr unterschiedliche Zielstellungen, Rahmenbedingungen und strukturelle Besonderheiten aufweisen (Ahmed et al., 2022a).

Das vorliegende Dokument verfolgt das Ziel, einen integrativen Bewertungsrahmen zur Erfassung und Beurteilung von Kreislauffähigkeit zu entwickeln, der auf einer methodisch fundierten Struktur basiert und gleichzeitig die nötige Flexibilität zur Anwendung in verschiedenen Kontexten bietet. Dies umfasst die Analyse bestehender Bewertungsansätze, die Ableitung eines normativen Zielbilds zirkulärer Systeme sowie die strukturierte Auswahl geeigneter Indikatoren. Ein besonderes Augenmerk liegt auf dem Aufbau eines konsistenten, mehrstufigen Indikatorenportfolios, welches die Bewertung der Kreislauffähigkeit über verschiedene Systemebenen (Nano-, Mikro-, Makroebene) hinweg integriert.



Dieses Indikatorenportfolio bildet den Kern des Bewertungsrahmens und soll eine vergleichbare, skalierbare und anwendungsorientierte Beurteilung zirkulärer Systeme ermöglichen. Es verknüpft quantitative und qualitative Bewertungsansätze und schafft dadurch eine Grundlage, um Fortschritte in der Umsetzung der CE konsistent zu erfassen.

Die Nanoebene dient dabei als methodischer Ausgangspunkt: Sie ermöglicht eine detaillierte Analyse individueller Produktsysteme und bildet die Basis für die Entwicklung und Validierung von Indikatoren, die auf den höheren Ebenen erweitert und aggregiert werden. In Kapitel 3 werden hierzu Ansätze und Methoden zur Bewertung auf Produktebene vorgestellt und anhand einer Fallstudie zum Produktsystem „Spülmittelkonzentrat“ vertieft. Diese Fallstudie zeigt exemplarisch, wie zirkuläre Prinzipien praktisch bewertet werden können. Gleichzeitig liefert sie empirische Erkenntnisse, die in den folgenden Kapiteln auf die Mikro- und Makroebene übertragen werden, um ein konsistentes Gesamtbild der Bewertungslogik zu erzeugen.

Ergänzend werden ein anwendungsorientiertes Bewertungsraster und ein Interpretationsrahmen entwickelt, die eine praxisgerechte Umsetzung und strategische Ableitungen ermöglichen. Neben ökologischen Kennzahlen, bspw. aus der Ökobilanzierung (Life Cycle Assessment, LCA), fließen auch ökonomische und soziale Aspekte in die Bewertung ein. Die erarbeiteten Konzepte und Methoden wurden im Rahmen des Forschungsprojekts DACE entwickelt und bilden die Basis für eine wissenschaftlich fundierte und praxisnahe Bewertung zirkulärer Systeme. Ziel ist es, politischen, wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Akteuren ein verlässliches Instrument für die Gestaltung und Steuerung zirkulärer Wertschöpfungsprozesse bereitzustellen.

Die Entwicklung valider Bewertungsansätze zur Beurteilung der Kreislauffähigkeit erfolgt vor dem Hintergrund bestehender gesetzlicher und regulatorischer Rahmenbedingungen, die maßgeblich zur strukturellen Ausgestaltung der CE beitragen. Insbesondere das Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG). Dieses bildet seit seiner Einführung 1996 und den Novellierungen 2012 und 2020 die zentrale gesetzliche Grundlage für die CE in Deutschland. Es verankert Prinzipien wie die fünfstufige Abfallhierarchie, die Produktverantwortung sowie die Priorisierung der stofflichen Verwertung. Ziel ist es, Materialien möglichst lange im Nutzungskreislauf zu halten und hochwertige Verwertungswege zu fördern. Der vorliegende Bewertungsrahmen orientiert sich an diesen Vorgaben und überführt sie in ein methodisch fundiertes Instrument zur Beurteilung von Kreislauffähigkeit.

Der Aufbau dieser Veröffentlichung gliedert sich in mehrere Kapitel entsprechend den Betrachtungsebenen. Bevor die Bewertung auf Nano-, Mikro- und Makroebene vertieft wird, werden im folgenden Kapitel die grundlegenden Konzepte, Prinzipien und Strategien der Kreislaufwirtschaft erläutert. Diese schaffen den theoretischen und methodischen Rahmen, auf dem die nachfolgenden Bewertungsansätze aufbauen. Nach dieser thematischen Grundlageneinführung (Kapitel 2) werden in Kapitel 3 Ansätze und Methoden zur Bewertung auf Nanoebene vorgestellt und anhand einer Fallstudie zum Spülmittelkonzentrat vertieft. Kapitel 4 konzentriert sich auf die Mikroebene, wobei zentrale Konzepte, Messansätze und ein integriertes Bewertungsrahmenwerk erläutert werden. In Kapitel 5 erfolgt schließlich die Betrachtung auf Makroebene, inklusive gesetzlicher Grundlagen, bestehender Indikatoren und Entwicklungsempfehlungen. Die Arbeit schließt mit einer Zusammenfassung der wichtigsten Erkenntnisse.



2 Grundlegende Konzepte und Umsetzungsstrategien der Kreislaufwirtschaft

Dieses Kapitel führt in die zentralen Konzepte, Prinzipien und strategischen Leitlinien der Kreislaufwirtschaft ein. Die dargestellten Grundlagen bilden die methodische Basis für die Bewertungssystematik in den nachfolgenden Kapiteln, insbesondere für die Analyse auf Produkt-, Unternehmens- und gesamtwirtschaftlicher Ebene.

Der Übergang zu einer CE erfordert die Einhaltung einer Reihe von Prinzipien, die eine neue Art des Produzierens und Konsumierens ermöglichen. Dabei werden Ressourcen kontinuierlich genutzt und Abfälle vermieden, während gleichzeitig ein Mehrwert für verschiedene Anspruchsgruppen geschaffen wird (Kristensen & Mosgaard, 2020). Diese Prinzipien sind eine wesentliche Grundlage für die wirksame Umsetzung von Maßnahmen der CE. In dieser Arbeit werden insgesamt neun Prinzipien der CE dargestellt, ausgearbeitet und auf Basis verschiedener Quellen strukturiert (**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**).

Systemisches Denken ist für die CE von grundlegender Bedeutung, da es das Verständnis für Zusammenhänge innerhalb eines Systems betont – Veränderungen in einem Teil wirken sich auf das gesamte System aus (EMF, 2013; International Organization for Standardization [ISO], 2024b; Kristensen & Mosgaard, 2020; Webster, 2017). Die Wertschöpfung in der CE konzentriert sich darauf, den höchstmöglichen Wert von Produkten und Materialien zu erhalten, bspw. durch die gemeinsame Nutzung von Produkten oder Maschinen zur Optimierung freier Kapazitäten. Eng damit verbunden ist die Wertverteilung, bei den Organisationen intern und extern zusammenarbeiten, um gegenseitigen Nutzen zu schaffen. Fair Trade ist ein Beispiel hierfür, da es Landwirten bessere Preise und technische Unterstützung bietet (EMF, 2013; ISO, 2024b; Kristensen & Mosgaard, 2020; Webster, 2017).

Ressourcenmanagement fördert den intelligenten, effizienten und verantwortungsvollen Umgang mit natürlichen Ressourcen – Recycling dient hier als zentrales Beispiel, da es den Bedarf an Primärrohstoffen verringert und Abfälle minimiert (EMF, 2013; ISO, 2024b; Kristensen & Mosgaard, 2020; Webster, 2017). Die CE priorisiert zudem erneuerbare Energiequellen und fordert Unternehmen auf, den Energieverbrauch durch Alternativen wie Wind- oder Solarenergie zu senken (EMF, 2013; ISO, 2024b; Kristensen & Mosgaard, 2020; Webster, 2017). Der Aufbau von Resilienz durch Vielfalt ist entscheidend: Unterschiedliche Lösungen wie industrielle Symbiose oder Polykultur ermöglichen es Unternehmen, sich besser an ökologische und wirtschaftliche Veränderungen anzupassen¹ (EMF, 2013; ISO, 2024b; Kristensen & Mosgaard, 2020; Webster, 2017).

¹ Industrielle Symbiose-Netzwerke fördern die Resilienz von Systemen durch hohe Redundanz, etwa durch viele Austauschpartner. Vielfalt gilt dabei als zentraler Mechanismus zur Stärkung der Resilienz, da unterschiedliche Akteure Ausfälle kompensieren können (Kennedy & Linnenluecke, 2021)



Abbildung 1: Grundprinzipien der Kreislaufwirtschaft im übergeordneten Kontext (EMF, 2013; ISO, 2024b; Kristensen & Mosgaard, 2020; Webster, 2017)

Zentral bei der Umsetzung von Kreislaufwirtschaft ist, dass Abfallvermeidung bereits in der Designphase beginnt, in der Produkte so konzipiert werden, dass sie leicht zerlegt und recycelt werden können, wodurch Abfälle reduziert werden. Schließlich stellt die Rückverfolgbarkeit von Ressourcen sicher, dass Organisationen über Herkunft und Nutzung ihrer Materialien informiert sind – digitale Produktpässe sind hierbei ein wichtiges Instrument zur Gewährleistung eines verantwortungsvollen Ressourcenmanagements. Zusammengenommen bilden diese Prinzipien einen ganzheitlichen Rahmen, der Unternehmen auf dem Weg zu mehr Nachhaltigkeit und Zirkularität leitet.

Um die Wirkung und den Fortschritt von CE-bezogenen Maßnahmen effektiv bewerten zu können, wäre es kontraproduktiv, Aspekte der CE zu messen, die außerhalb dieses Kontexts liegen. Gleichzeitig stellt die Operationalisierung dieser Prinzipien eine erhebliche Herausforderung dar und kann für die Beteiligten schwer verständlich und zu komplex sein. In diesem Zusammenhang erscheint ein verlässlicherer Ansatz in der Anwendung von CE-Strategien zu liegen. Jedes System zur Leistungsbewertung der CE sollte auf den nachfolgenden Prinzipien basieren.

Drei grundlegende Strategien bilden die Basis für die Umsetzung von Zirkularität: Verengung, Verlangsamung und Schließung (Bocken et al., 2016). Die Strategie der Verengung bezieht sich auf eine intensivere Nutzung von Ressourcen oder deren verlängerte Verwendung. Die Verlangsamung zielt darauf ab, den Ressourcenverbrauch durch eine Verlängerung der Produktlebensdauer zu reduzieren.



Die Schließung konzentriert sich auf das Schließen von Ressourcenkreisläufen durch Recycling zwischen der Nachnutzung und der Produktion, wodurch ein kontinuierlicher Fluss von Materialien im System ermöglicht wird. Diese Strategien lassen sich darauf aufbauend in drei Kategorien einteilen: intelligenter Produkteinsatz und -herstellung (Verengung), Verlängerung der Produktlebensdauer (Verlangsamung) und sinnvolle Materialverwendung (Schließung).

Diese übergeordneten Strategien werden gemäß Potting et al. (2017) in zehn spezifische Maßnahmen weiter untergliedert (siehe Abbildung 2).



Abbildung 2: Strategien der Kreislaufwirtschaft – Eine makroökonomische Perspektive und die Unterteilung in zehn verschiedene Typen (Bocken et al., 2016; Potting et al., 2017)

Die Strategien Vermeidung, Umdenken und Reduktion zielen darauf ab, unnötigen Ressourcenverbrauch zu vermeiden, Produkte und Geschäftsmodelle für die CE neu zu gestalten und den Ressourceneinsatz durch effiziente Produktionsmethoden zu minimieren. Die detaillierteren Strategien zur Verlangsamung des Konsums – nämlich Reparatur, Wiederaufarbeitung, Wiederherstellung und Umnutzung – sind entscheidend, um die Lebenszyklen von Produkten zu verlängern und neue Verwendungsmöglichkeiten für bestehende Produkte zu schaffen. Diese Ansätze unterstützen die Verlängerung der Nutzungsdauer von Gütern und tragen zur Nachhaltigkeit bei, indem sie eine wiederholte Nutzung mit minimalen Eingriffen ermöglichen. Die Strategien Recycling und Rückgewinnung zielen darauf ab, den Materialwert zurückzugewinnen, indem Abfälle in verwertbare Formen umgewandelt und Energie oder Nährstoffe rückgewonnen werden. Zusammen bilden diese Strategien einen umfassenden Rahmen zur Förderung der Ziele der CE durch verantwortungsbewusstes Ressourcenmanagement, die Verringerung der Umweltbelastung und die Entwicklung innovativer, systemischer Ansätze.



3 Kreislaufwirtschaftsbewertung auf Nanoebene

Aufbauend auf den in Kapitel 2 dargestellten grundlegenden Prinzipien und Strategien der Kreislaufwirtschaft richtet sich dieses Kapitel auf die Bewertung zirkulärer Ansätze auf der Nanoebene. Diese Ebene bildet den methodischen Ausgangspunkt des Bewertungsrahmens, da hier die zirkuläre Leistungsfähigkeit einzelner Produkte, Komponenten und Materialien detailliert analysiert werden kann. Die auf dieser Ebene gewonnenen Erkenntnisse dienen zugleich als empirische Basis für die Bewertung auf Mikro- (Kapitel 4) und Makroebene (Kapitel 5).

Die Messung des Fortschritts einer Kreislaufwirtschaft hat sich zu einem wichtigen Forschungsschwerpunkt entwickelt (Kristensen & Mosgaard, 2020). Trotz der zunehmenden Zahl von Rahmenwerken und Methoden zur Kreislaufwirtschaftsbewertung, bleibt die Entwicklung und konsequente Anwendung robuster Kreislaufwirtschaftsindikatoren ein Bereich aktiver Forschung und Debatte (Ferrante et al., 2025; Luthin et al., 2023). Die Transformation zu einer nachhaltigen CE erfordert nicht nur eine erhöhte Zirkularität, sondern auch die Berücksichtigung ökologischer, sozialer und ökonomischer Aspekte über die gesamte Wertschöpfungskette hinweg (BMUKN, 2024). Eine ganzheitliche Bewertung all dieser Aspekte ist herausfordernd, auch aufgrund wachsender Diversität von Produktsystemen und Geschäftsmodellen im Rahmen der Kreislaufwirtschaft (Ahmed et al., 2022b).

Als Basis des Bewertungsrahmens wird eine kurze Übersicht zur aktuellen Forschungslandschaft gegeben. Zur Beibehaltung der Übersichtlichkeit wird hierbei ein methodischer Schwerpunkt auf die Ökobilanzierung und Zirkularitätsbewertung im Kontext Kreislaufwirtschaft gesetzt. Anschließend wird die bestehende Bewertungsmethodik beispielhaft anhand einer Fallstudie angewendet, um das Vorgehen von einer klaren Zielstellung bis hin zur Interpretation der Ergebnisse zu verdeutlichen. Die Durchführung von Fallstudien ist wichtig, um neue Bewertungsmethoden in verschiedenen Sektoren auf Anwendbarkeit zu testen und diese weiter zu optimieren (Ferrante et al., 2025).

3.1 Die entscheidende Rolle der Messung der Zirkularität in der Unternehmenspraxis

Unternehmen suchen nach Orientierungshilfen zur Umsetzung zirkulärer Praktiken in ihren Geschäftsprozessen und benötigen praktische Ansätze, um Zirkularität operativ umzusetzen. Diese Unterstützung wird auf allen Hierarchieebenen benötigt: strategisch, taktisch und operativ (Barreiro-Gen & Lozano, 2020). Daher betonen Baratsas et al. (2022), dass Instrumente zur Messung und Bewertung von Zirkularität auf verschiedenen systemischen Ebenen wesentlich sind, um den Übergang zu zirkulären Wirtschaftssystemen zu ermöglichen. Wie von Sassanelli et al. (2019) hervorgehoben, gilt: Um ein System steuern zu können, muss es messbar sein; dies trifft auch auf Ressourcen innerhalb eines zirkulären Systems zu. Kristensen und Mosgaard (2020) vertreten eine ähnliche Auffassung und weisen darauf hin, dass eine erfolgreiche Transformation zur CE die Fähigkeit zur Messung und Berichterstattung über Fortschritte voraussetzt.

Als zentrale Komponente von Leistungsmessungssystemen stellt der Einsatz von Indikatoren damit einen wesentlichen Ermöglicher der Zirkularität dar, da er datenbasierte Entscheidungsprozesse sowie die Nachverfolgung von Fortschritten unterstützt. Indikatoren sind grundlegend für die Bewertung der Wirksamkeit eines Systems, da sie eine entscheidende Rolle bei der Definition von organisatorischen Zielen und Leistungserwartungen spielen.



Sie bieten eine strukturierte Grundlage zur Überwachung von Fortschritten, zur Ausrichtung strategischer Zielsetzungen und zur Steuerung kontinuierlicher Verbesserungen innerhalb organisatorischer Initiativen (Neely et al., 2000). Dieser analytische Ansatz erleichtert die Bewertung der ganzheitlichen Vorteile von Strategien der zirkulären Wirtschaft und kann als Grundlage für die Einschätzung des durch den Übergang zur zirkulären Wirtschaft geschaffenen Wertes dienen (Rincón-Moreno et al., 2021).

Trotz der von verschiedenen Autoren anerkannten Bedeutung besteht bislang kein Konsens darüber, wie CE auf Mikroebene gemessen werden kann. Tatsächlich existiert keine allgemein anerkannte Methode zur Messung der CE auf dieser Ebene (Kristensen & Mosgaard, 2020; Sassanelli et al., 2019). Dennoch wurden einige Instrumente und Rahmenwerke auf System-, Unternehmens- und Produktebene entwickelt, um Kennzahlen zur Bewertung der Zirkularität bereitzustellen. Es ist bemerkenswert, dass die meisten Indikatoren zur CE erst in den letzten Jahren veröffentlicht wurden, was das wachsende Interesse sowie die zunehmende Dringlichkeit zur Messung der zirkulären Leistung widerspiegelt (Rincón-Moreno et al., 2021).

3.2 Stand der Forschung zur Kreislaufwirtschaftsbewertung auf Produktebene

Die Autoren Ferrante, Vitti und Sassanelli haben im Jahr 2025 eine systematische Literaturrecherche durchgeführt, um die Evolution der Kreislaufwirtschaftsbewertung zu untersuchen. Die Ergebnisse zeigen, dass die Ökobilanz, gefolgt von Multi Criteria Decision Making (MCDM), die am weitesten verbreitete Methode für die Bewertung der Umweltauswirkungen von Kreislaufsystemen über den gesamten Lebenszyklus ist (Ferrante et al., 2025). Das Ziel von MCDM ist die logische Bestimmung der Gewichtung zwischen mehreren Metriken zur Durchführung einer Bewertung, bspw. der Produktlebensdauer, der Recyclingquote und den CO₂-Emissionen pro Produkteinheit (Kim et al., 2022). Dies ist im Kontext von Kreislaufwirtschaft relevant, da die darin enthaltenen Ziele z. T. im Konflikt zueinanderstehen können (Karayilan et al., 2021). Das Rahmenwerk von Ahmed et al. (2022b) „A comprehensive multi-level circular economy assessment framework“ nutzt bspw. Fuzzy-Logik und MCDM, um sowohl qualitative als auch quantitative Indikatoren zu integrieren, und demonstriert seine Anwendbarkeit anhand eines Beispiels.

Bevor allerdings eine Gewichtung verschiedener Indikatoren vorgenommen werden kann, sollte festgelegt werden, welche Metriken für die CE-Bewertung berücksichtigt werden sollten. Die Auswahl der geeigneten Indikatoren ist grundsätzlich abhängig von dem spezifischen Anwendungsfall und der Zielstellung der Bewertung, also z. B. die Forschungsfrage, die beantwortet werden soll (Ahmed et al., 2022a); (Pauliuk, 2018); (Saidani et al., 2019). Aufgrund der enormen Vielfalt an Unternehmen, Produkten, Bewertungszielen und -umfängen ist das Vorschreiben eines fallunspezifischen Indikatorensatzes sehr herausfordernd. Ahmed et al. (2022b) haben deshalb ein Rahmenwerk entwickelt, welches eine Schritt-für-Schritt-Anleitung zum Indikatoren-Auswahl-Prozess für verschiedene CE-Ebenen beinhaltet. Ähnlich dazu haben Saidani et al. (2019) als Hilfestellung zur fallspezifischen Indikatorenauswahl eine Taxonomie entwickelt, die 55 Indikatoren nach 10 Kategorien klassifiziert. Daran anknüpfend wurde ein Excel-basiertes Tool bereitgestellt, welches Nutzende bei der Auswahl relevanter Indikatoren durch die Eingabe der zutreffenden Optionen für die jeweilige Kategorie unterstützt (Saidani et al., 2019). Luthin et al. (2023) wendet sechs der zehn Kategorien von Saidani für das Screening von 133 CE-Indikatoren an, um geeignete CE-Indikatoren für die Integration in ein Circular Life Cycle Assessment (C-LCA) Rahmenwerk zu identifizieren. Dieses Rahmenwerk ist so konzipiert, dass es Sektor-unspezifisch zur Kreislaufwirtschaftsbewertung für Produkte und Dienstleistungen anwendbar ist. Ergänzend



zu den ermittelten CE-Indikatoren und einer Ökobilanzierung, empfehlen Luthin et al. (2023) die Durchführung eines Life Cycle Costings (LCC) und Social Life Cycle Assessments (S-LCA). In Summe sollen diese Methoden eine ganzheitliche Nachhaltigkeits- (LCSA) und Zirkularitätsbewertung ermöglichen (Luthin et al., 2023). Anstatt Kreislaufwirtschaft, Zirkularität und ökologische Nachhaltigkeit als getrennte Ziele zu behandeln, ermöglicht die Integration im Rahmen des C-LCA die Erkennung potenzieller Kompromisse oder Synergien zwischen der Schließung von Materialkreisläufen und der Minimierung von Umweltbelastungen. Dies ist besonders wichtig, da eine zunehmende Kreislaufwirtschaft nicht automatisch geringere Umweltauswirkungen garantiert (Anastasiades et al., 2020; Luthin et al., 2023; Rigamonti & Mancini, 2021). Die systematische Literaturrecherche von Oliveira et al. (2021) untermauert die Notwendigkeit einer solchen konsolidierten Methodik bei der LCSA parallel zu Zirkularitätsindikatoren eingesetzt werden. Die Nachhaltigkeitsperformance wird in manchen CE-Indikatoren zwar integriert, jedoch meist nur oberflächlich und in einem unzureichenden Umfang (Oliveira et al., 2021).

Die ISO 59020:2024 stellt ein ähnliches sektorunspezifisches Rahmenwerk zur Kreislaufwirtschaftsbewertung dar. Neben allgemeinen Indikatoren auf der Grundlage von Ressourcenströmen, wird ebenfalls eingeräumt, dass ein LCSA dabei unterstützen kann die CE-Maßnahmen mit dem größten Kreislaufwirtschaftspotenzial zu identifizieren. Im Gegensatz zu vielen komplexen Indikatoren werden die ISO-Kernindikatoren anhand einfacher Formeln berechnet und in fünf Kategorien eingeteilt. Diese Indikatoren umfassen neben den Materialströmen auch Wasser-, Energie- und Finanzströme (ISO, 2024a). Neben generischen Rahmenwerken gibt es auch einige Studien zu branchenspezifischen Indikatoren oder kombinierten Ansätzen. Einige werden im Rahmen der Fallstudie vorgestellt, um Vor- und Nachteile zu verdeutlichen.

Wie bereits eingangs erwähnt, ist trotz der zunehmenden Anzahl an Rahmenwerken und Methoden zur Kreislaufwirtschaftsbewertung die Forschung in diesem Bereich noch nicht abgeschlossen und gesättigt. Es besteht nach wie vor keine universelle, standardisierte und umfassende Methodik zur Bewertung der CE-Leistung in verschiedenen Sektoren und auf verschiedenen Ebenen. Den derzeitigen Methoden mangelt es oft an Konsistenz, Vergleichbarkeit und Anwendbarkeit auf komplexe Systeme, was den Bedarf an weiteren Verbesserungen verdeutlicht. Angesichts des wachsenden Interesses an der Einführung von CE-Praktiken und neu entstehenden Normen und Rahmenwerken (z. B. ISO 59000 und Digital Product Passport (DPP)) ist dies von großer Bedeutung (Ferrante et al., 2025).

Um dem Überangebot an neuen Bewertungsmethoden entgegenzuwirken, liegt der Schwerpunkt in DACE darauf, sich bestehender Indikatoren zu bedienen und diese auf Relevanz und Eignung für verschiedene Produktsystembewertungen zu prüfen, statt gänzlich neue Methoden zu entwickeln (Corona et al., 2019; Janik & Ryszko, 2019; Luthin et al., 2023; Parchomenko et al., 2019; Saidani et al., 2019). Im Folgenden wird auf den ökologischen Aspekt der Bewertung fokussiert mit einem inhaltlichen Schwerpunkt auf die „Zirkularitätsbewertung“ und „Ökobilanzen im Kontext von Kreislaufwirtschaftsbewertung“. Dies ermöglicht eine fokussierte Diskussion und Bewertung im Rahmen von Fallstudien. Nichtsdestotrotz sind für eine ganzheitliche Analyse auch die Aspekte der sozialen und ökonomischen Nachhaltigkeit zu berücksichtigen (ISO, 2024a; Luthin et al., 2023).



3.3 Ökobilanzierung als Komponente der Nachhaltigkeits- und Kreislaufwirtschaftsbewertung von Produkten

Die Nachhaltigkeitsbewertung über den gesamten Lebenszyklus (Life Cycle Sustainability Assessment, LCSA) kombiniert LCA, LCC und S-LCA. LCSA umfasst alle Nachhaltigkeitsdimensionen für dieselbe Funktionseinheit (FU) sowie Systemgrenzen und wird daher von der ISO 59020:2024 als geeignete methodische Grundlage und relevanter Ansatz im CE-Kontext angesehen. Unter Systemgrenzen wird die gedankliche Abgrenzung eines Systems gegenüber seiner Umwelt verstanden, sie definieren, welche Prozesse, Stoffflüsse und Lebenszyklusphasen in die Analyse einbezogen werden und welche außerhalb bleiben. Wie bereits erwähnt, konzentriert sich die Fallstudie auf die Durchführung einer LCA bzw. Ökobilanzierung nach ISO (2021b), um eine detaillierte und fokussierte Diskussion und Bewertung der ökologischen Auswirkungen zu ermöglichen. Die Ökobilanz wurde ursprünglich für die Bewertung einzelner Lebenszyklen entwickelt. In CE-Kontexten ist es jedoch unerlässlich, verschiedene CE-Maßnahmen ganzheitlich zu modellieren und zu vergleichen, was eine Berücksichtigung mehrerer Lebenszyklen (engl. „multiple loops“) erfordert (Luthin et al., 2023). Diese Anforderung bringt einige Herausforderungen für den traditionellen LCA-Ansatz mit sich, die zu methodischen Diskussionen führen, z. B. über die von der Rezyklatqualität abhängigen Substitutionen (Bayram et al., 2024); (Luthin et al., 2023). Diese Studie zielt darauf ab, zunächst die in der bisherigen Literatur vorgeschlagenen Lösungen für die zentralen Herausforderungen zusammenzufassen. Anschließend werden die für die Fallstudie geeigneten Ansätze identifiziert und angewendet.

3.3.1 Methodische Herausforderungen bei der Durchführung von LCA im Kontext von CE

Die Grundlagen zur Durchführung einer Ökobilanzierung sind in der ISO 14044 detailliert beschrieben und werden hier nicht weiter vertieft. Allerdings werden elementare Aspekte anhand der Fallstudie aufgegriffen und erläutert im anschließenden Kapitel **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden..** Eine grundlegende Herausforderung bei der Durchführung einer LCA im Kontext von CE stellt die Frage dar, wie die Aufwendungen, die während den verschiedenen Lebenszyklen anfallen, korrekt allokiert werden können. Im Kontext der R-Strategie Recycling bspw. - welchem Lebenszyklus werden die Umweltauswirkungen der Recyclingprozesse zugeschrieben? Je nach Forschungsfrage und Zielstellung, gibt es verschiedene Allokations-Ansätze, die zur Zuordnung der Auswirkungen genutzt werden können. Es gibt keine einheitlich standardisierte Methodik zur Verteilung von Recyclingaufwendungen und -gutschriften zwischen verschiedenen Lebenszyklen (Corona et al., 2019)); (Frischknecht, 2010) und (Ekvall et al., 2020) bezeichnen aber den Cut-off-Ansatz und den Avoided-Burden-Ansatz als Basis für alle weiteren Ansätze bzw. stellen beiden Extreme dar, zwischen denen sich die anderen Ansätze bewegen. Im Folgenden werden einige relevante Verfahren beschrieben und diskutiert.

Cut-off-Ansatz: Zuordnungsverhältnis 100:0, d. h. die Auswirkungen des Recyclingprozesses werden vollständig dem Produkt zugeordnet, in dem das Rezyklat eingesetzt wird. Das Produkt, das den Abfall erzeugt, wird nicht durch die Abfallbehandlung belastet. Auch die Auswirkungen der Produktion von Neumaterialien werden vollständig dem Produkt zugerechnet, in dem sie verbraucht werden (Hermansson et al., 2022; WBCSD, 2021). Eine Visualisierung ist in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** zu finden, mit der Zeit (t) auf der x-Achse, den Umwelteinflüssen auf der y-Achse und der gesetzten Systemgrenze nach dem Cut-off-Ansatz (Suski & Wiesen, 2016).

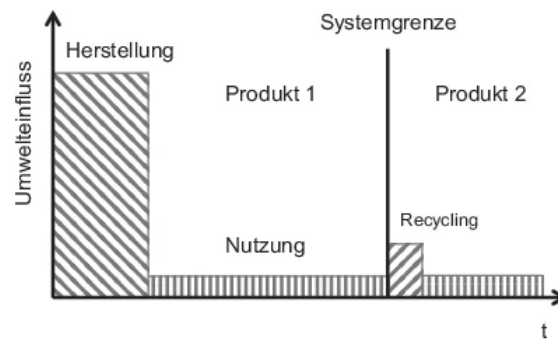


Abbildung 3: Umwelteinflüsse nach der Cut-Off Methode über die Lebenszyklusphasen Herstellung, Nutzung und End-of-Life/Recycling (Suski & Wiesen, 2016) nach (Frischknecht, 2010)

Der zentrale Nachteil der Cut-off-Methodik ist, dass nicht berücksichtigt wird, ob ein Produkt im EoL (End of Life) recycelt, deponiert oder energetisch verwertet wird. Die Recyclingfähigkeit eines Produktes ist allerdings ein essenzieller Parameter im Kontext der Kreislaufwirtschaft, welcher für eine Kreislaufwirtschaftsbewertung berücksichtigt werden sollte (Obrecht et al., 2022).

Avoided-Burden-Ansatz: Zuordnungsverhältnis 0:100, d. h. jedes Produkt trägt die Last und die Gutschrift des von ihm erzeugten bzw. zugehörigen Abfalls. Die Aufwendungen, die für die Herstellung des Recyclatanteils entstehen (durch das Abfallrecycling) und die Einsparungen durch die Substitution der Produktion von Neumaterial, werden folglich dem Produkt zugeordnet, welches das Input-Material für das Recycling darstellt (Hermansson et al., 2022; WBCSD, 2021). Eine Visualisierung ist in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** zu finden, mit der Zeit (t) auf der x-Achse, den Umwelteinflüssen auf der y-Achse und der gesetzten Systemgrenze nach dem Avoided-Burden-Ansatz (Suski & Wiesen, 2016).

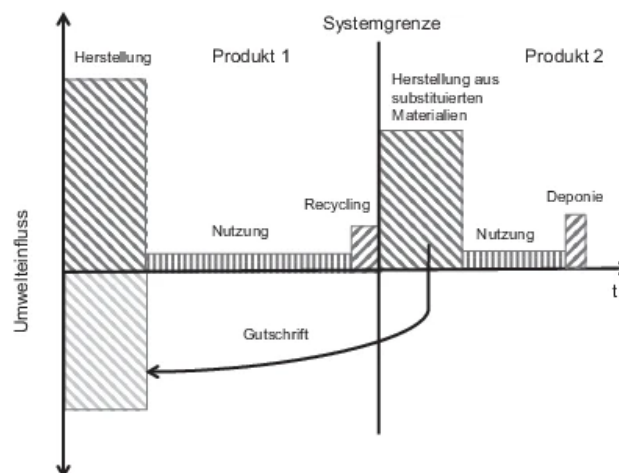


Abbildung 4: Umwelteinflüsse nach der Avoided-Burden-Methode über die Lebenszyklusphasen Herstellung, Nutzung und End-of-Life (Recycling) inkl. Gutschriftenvergabe (Suski & Wiesen, 2016)



Anders als der Cut-off-Ansatz, belohnt die Avoided-Burden-Methode die potenzielle Recyclingfähigkeit eines Produkts und fördert dadurch „Design for Recycling“ (Suski & Wiesen, 2016). Der Schwachpunkt der Avoided-Burden-Methodik ist, dass die Vorteile eines möglichen Rezyklateinsatzes vernachlässigt werden. Zur Förderung einer Kreislaufwirtschaft, ist es allerdings wichtig, dass diese Potenziale explizit berücksichtigt und hervorgehoben werden. (Obrecht et al., 2022)

Circular Footprint Formula (CFF): Entwickelt im Rahmen des EU Product Environmental Footprints (PEF) (EU JRC, 2022). Diese berücksichtigt sowohl den Einsatz von Rezyklat als auch die Umweltauswirkungen, die mit dem Recycling, der Energierückgewinnung und der Entsorgung am EoL des Produkts verbunden sind. Somit stellt diese Methode einen Kompromiss der Cut-off- und der Avoided-Burden-Methode dar. Im Gegensatz zu Allokationsmethoden, die entweder den Input oder den Output von Recyclingprozessen in den Vordergrund stellen, integriert der CFF beides. Das bedeutet, einem Produkt werden sowohl die Auswirkungen des „Up-Streams“ (vorgelagerter Prozesse) als auch des „Down-Streams“ (nachgelagerter Prozesse) zugeschrieben. Damit die Aufwendungen für den Recyclingprozess, welches den Up-Stream des Produkts A und den Down-Stream des Produkts B darstellt, nicht doppelt gezählt werden, bedarf es einer Verteilung der Aufteilung über die CFF. Diese enthält Variablen wie die Qualitätsminderung des Materials und Marktallokationskoeffizienten für die stoffliche und energetische Verwertung mit dem Ziel, die Marktinteraktionen (Angebot und Nachfrage nach Sekundärstoffen) abzubilden. Die Komplexität der Formel resultiert aus der Notwendigkeit, materialspezifische Werte lebenszyklusphasenübergreifend zu berechnen, dies macht ihre praktische Anwendung jedoch herausfordernd (The Battery Pass consortium, 2023); (EU JRC, 2019).

50:50-Ansatz: Verwendet dasselbe Konzept wie CFF, nur vereinfacht. Die Umweltbelastungen durch die Produktion des Primärmaterials, durch die EoL-Behandlung und die finale Entsorgung werden gleichmäßig zwischen dem Produkt, aus dem das Rezyklat hergestellt wird, und dem Produkt, in dem das Rezyklat eingesetzt wird, aufgeteilt. Dieser Ansatz vermeidet die Komplexitäten des CFF und stellt einen Kompromiss zwischen dem Cut-off- und dem Avoided-Burden-Ansatz dar. (Corona et al., 2019; Ekvall et al., 2020)

Eine übersichtliche Zusammenfassung der Vor- und Nachteile der vorgestellten Methoden, sowie ihrer Fähigkeit zu einer Kreislaufwirtschaft beitragen zu können ist übertragen aus Obrecht et al. (2022) in Tabelle 1 zu finden.



Tabelle 1: Positive und negative Aspekte der Allokationsansätze und ihre Fähigkeit, einen Beitrag zur Kreislaufwirtschaft zu vgl. (Obrecht et al., 2022)

Allokationsansatz	Positiv	Negativ	Kreislaufwirtschaft
Cut-off	• Belohnt die Verwendung von recycelten Materialien • Einfache Anwendung • Verringert die mit dem künftigen Recycling verbundene Unsicherheit	• Vernachlässigt Vorteile der Herstellung von Rezyklat am EoL	nein
Avoided Burden	• Belohnt die Herstellung von recycelten Materialien	• Vernachlässigt die Vorteile der Verwendung recycelter Materialien	nein
50:50	• Ein Kompromiss zwischen Cut-off und Avoided Burden	-	ja
CFF (PEF)	• Ein Kompromiss zwischen Cut-off und Avoided Burden • Einführung von Faktoren für die Qualitätsunterschiede zwischen Primär- und Sekundärmaterialien	• Qualitätsfaktoren sind oft nicht verfügbar	ja

Laut aus (Obrecht et al., 2022) eignen sich folglich v.a. die hybriden Allokationsmethoden für Kreislaufwirtschaftsbewertungen. Azuaje et al. (2025) und Bergsma und Sevenster (2013) empfehlen ergänzend eine Reihe von möglichen Entscheidungskriterien, die Ökobilanzierenden bei der Methoden-Auswahl für ihre jeweilige spezifische Fallstudie berücksichtigen können. Eine Zusammenfassung dieser Kriterien ist in Tabelle 2 dargestellt.



Tabelle 2: Auswahlkriterien für die Zuteilungsmethode (Azuaje et al., 2025); (Bergsma & Sevenster, 2013))

Kriterium	EoL Recycling	Cut-off	Hybrid
Materialeigenschaften	Metalle/Glas (kein Qualitätsverlust)	Fasern / Kunststoffe (Qualitätsabbau)	Gemischte Material Systeme
Produktlebensdauer	Kurzlebig (Verpackung)	Langlebig (Konstruktion)	Mäßig langlebige Produkte
Marktdynamik	Hohe Abfallnachfrage	Unsichere Abfallmärkte	Regionale Variabilität
Regionale Praktiken	Verbrennung (die EU)	Deponierung (USA)	-
LCA-Art	Consequential analysis	Attributional footprinting	Politisch orientierte Studien
Normen	EU-Politik, ISO 14044	Nordamerikanische Protokolle	Sektorspezifische Standards
Datenverfügbarkeit	Robuste Recyclingdaten	Begrenzte Datenverfügbarkeit	Teilweise geschlossene Kreisläufe
Anreizstruktur	Fördert die Abfallsammlung	Fördert Rezyklateinsatz	Gleichgewicht der Interessensgruppen

Je nach Zielstellung der Untersuchung wird empfohlen, eine Allokation zu vermeiden und stattdessen eine Systemerweiterung („system expansion“) durchzuführen (ISO, 2021a). Dies ist v. a. im Falle eines „Closed-Loop Recyclings“ hilfreich. Bei einem Closed-Loop Recycling werden Materialien innerhalb desselben Produktsystems wiederverwendet, z. B. im geschlossenen Recyclingsystem von zurückgegeben Pfandflaschen, aus denen neue Flaschen hergestellt werden. Voraussetzung hierfür ist i. d. R. eine ähnliche Qualität und Funktionalität des Rezyklats im Vergleich zum Neu-Material. In diesem Fall ist eine Allokation redundant und sollte vermieden werden, da das Sekundärmaterial direkt neue Materialien im Input ersetzt.

Systemerweiterung: es werden z. B. zuvor abgeschnittene EoL-Prozesse wie die Produktion von Sekundärmaterialien (aus entsorgten Produkten) und deren Einsatz in neuen Produkten berücksichtigt und in das betrachtete System eingeschlossen. Mit anderen Worten, dieser Ansatz macht eine Allokation in Kreislaufsystemen überflüssig, indem z. B. Aufwände für das Recycling keinem bestimmten Lebenszyklus mehr zugeschrieben werden, sondern mehrere Zyklen in Summe bewertet werden (Papo & Corona, 2022); (Pellengahr et al., 2023). Im Gegensatz zu den Cut-off- und EoL-Recyclingansätzen wird eine breitere Systemperspektive eingenommen, sodass die Auswirkungen der vorgelagerten und nachgelagerten Prozesse berücksichtigt werden. Der Nachteil der Systemerweiterung ist, dass es z. T. schwierig sein kann die tatsächlichen Umweltauswirkungen eines bestimmten Lebenszyklus zu ermitteln. Zudem erfordert die Anwendung der Systemerweiterung ein Verständnis der Marktbedingungen für Nebenprodukte (Energie oder Material) (ISO, 2021a).

Net Scrap: eine Sonderform der Systemerweiterung, welche adressiert, dass die Menge des Recycling-Outputs eines Produktsystems ggf. nicht dem recycelten Ausgangsmaterial als Input in der Produktionsphase entspricht (Pellengahr et al., 2023). Für die Berücksichtigung von Recyclingaktivitäten wird jedem System am Ende der Lebensdauer der produzierte „Nettoabfall“ gutgeschrieben (die Differenz zwischen dem am Ende der Lebensdauer produzierten Sekundärmaterials und dem Sekundärmaterialeinsatzes, unter Berücksichtigung der Verluste).



Falls der Rezyklateinsatz höher als der -output ist, wird das System erweitert, um den Recyclingprozess, der für die zusätzlichen recycelten Rohstoffe benötigt wird (Błażejowski et al., 2021). Ergänzend zu den zuvor präsentierten Entscheidungshilfen und Kriterien aus 1 und 2, sollte untersucht werden, welche Methodik ähnlicher Studien (z. B. ähnliche Produktsysteme oder Zielstellungen) verwenden. Wird dieselbe Methodik wie in vorherigen Studien verwendet, besteht eine höhere Vergleichbarkeit der Ergebnisse. In jedem Fall sollte die Auswahl der Methodik gut begründet und sofern möglich, mit Literatur untermauert werden.

3.3.2 Untersuchte Produktsysteme im Rahmen der Fallstudie „Spülmittelkonzentrat“

Die Auswahl der geeigneten Indikatoren ist grundsätzlich abhängig von dem spezifischen Anwendungsfall und der Zielstellung der Bewertung, also z. B. die Forschungsfrage, die beantwortet werden soll (Ahmed et al., 2022b); (Pauliuk, 2018); (Saidani et al., 2019). Folglich ist die Durchführung von Fallstudien wichtig, um neue Bewertungsmethoden in verschiedenen Sektoren auf Anwendbarkeit zu testen und diese weiter zu optimieren (Ferrante et al., 2025). Bei Kunststoffverpackungen handelt es sich in der Regel um lineare Einwegprodukte mit einer kurzen Lebensdauer. Um eine CE zu erreichen, sollten möglichst höhere R-Strategien bevorzugt werden (Potting et al., 2017). Im Kontext von Verpackungen bedeutet das, dass intelligentere Produktherstellungsstrategien, z. B. durch die Reduzierung von Verpackungsmaterialeinsatz oder „Design for Reuse“ bevorzugt werden sollten im Vergleich zum stetigen Aufrüsten von Recyclinganlagen. Aus diesem Grund werden die potenziellen Auswirkungen eines zirkulären Verpackungsdesigns im Rahmen einer Fallstudie anhand einer Kreislaufwirtschaftsbewertung ermittelt.

Die Ausgangsidee des neuen Produktsystems ist es, dass die Flasche, in der das konventionelle Spülmittel verkauft wird, keine Einwegverpackung mehr darstellt, sondern als eine Mehrwegflasche genutzt werden soll (Rethink und Reuse). Ziel der Fallstudie „Spülmittelkonzentrat“ ist es zu ermitteln, ob das neue Produktsystem des „Nachfüll-Spülmittelkonzentrats“ im Vergleich zu einem herkömmlichen Spülmittel-Produktsystem zu mehr Kreislaufwirtschaft beiträgt. Diese Fallstudie adressiert zahlreiche R-Strategien und eignet sich daher gut als ein potenzielles Best-Practice Beispiel. Die Flasche besteht aus einem Polyethylenterephthalat-Rezyklat (rPET) Flaschenkörper, einem Polypropylen (PP) Label und einem High Density Polyethylen (HDPE) Deckel. Zur Wiederverwendung der Flasche kann der Konsument das neue Produkt, den „Refill“ bzw. das Konzentrat in einem Standbodenbeutel (engl. Pouch) aus Low Density Polyethylen (LDPE) in die Flasche befüllen. Die Flasche kann dann mit Leitungswasser aufgefüllt und gemischt werden und ruhen. Anschließend kann es analog zum konventionellen, bereits vorab verwässerten Spülmittel, genutzt werden. Hierdurch wird Kunststoff eingespart, indem der Kauf von in Einwegkunststoff verpacktem Wasser, vermieden wird. Dies entspricht der R-Strategie Refuse. Zudem hat es den Effekt, dass das Verpackungsvolumen und die -masse reduziert werden (Reduce). Die adressierten R-Strategien sind in der folgenden in Tabelle 3 zusammengefasst zur Übersicht.



Tabelle 3: Beschreibungen der R-Strategien innerhalb der Fallstudie

R-Strategie		Beschreibung der R-Strategie innerhalb der Fallstudie
R0	Refuse	Vermeidung von in Einwegkunststoff verpacktem Wasser
R1	Rethink	Neues Produktsystem - Konzentrat anstelle von (verwässertem) konventionellem Spülmittel
R2	Reduce	Reduziertes Verpackungsvolumen und -masse
R3	Reuse	Wiederverwendung der Einwegflasche (Intensivierung der Nutzung)
R8	Recycle	Recycling des Flaschenkörpers / des Deckels / des Standbodenbeutels
R9	Recover	Energetische Verwertung der Verpackungskomponenten, die nicht recycelt werden

Eine visuelle Darstellung der beiden vereinfachten Produktsysteme ist in Abbildung 5 und Abbildung 6 zu finden. Hier wird v. a. auf die Materialinputs und -verluste der beiden Verpackungsarten eingegangen, da dies laut Herstellern den entscheidenden Unterschied zwischen beiden Produktsystemen darstellt (hierzu mehr im Kapitel 0). Die schwarz-gestrichelten Linien stellen die Systemgrenzen dar. Zu sehen sind die verschiedenen Stationen bzw. Lebenszyklusphasen, die die Kunststoffverpackungen durchlaufen, beginnend mit der Produktion, dem konsumierenden Haushalt, der Abfallsammlung, -Sortierung und -Recycling sowie der Verbrennung.

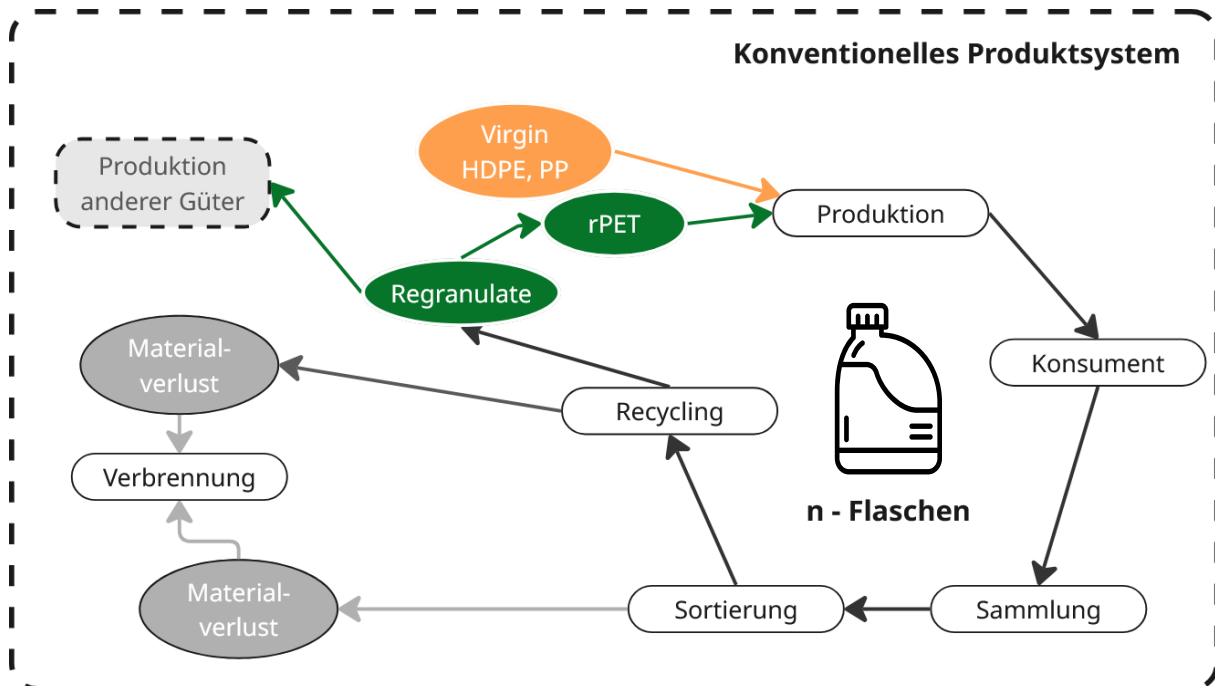


Abbildung 5: Schematische Darstellung des Produktsystems des konventionellen Spülmittels (eigene Darstellung, Produktbilderquelle: www.pril.de)

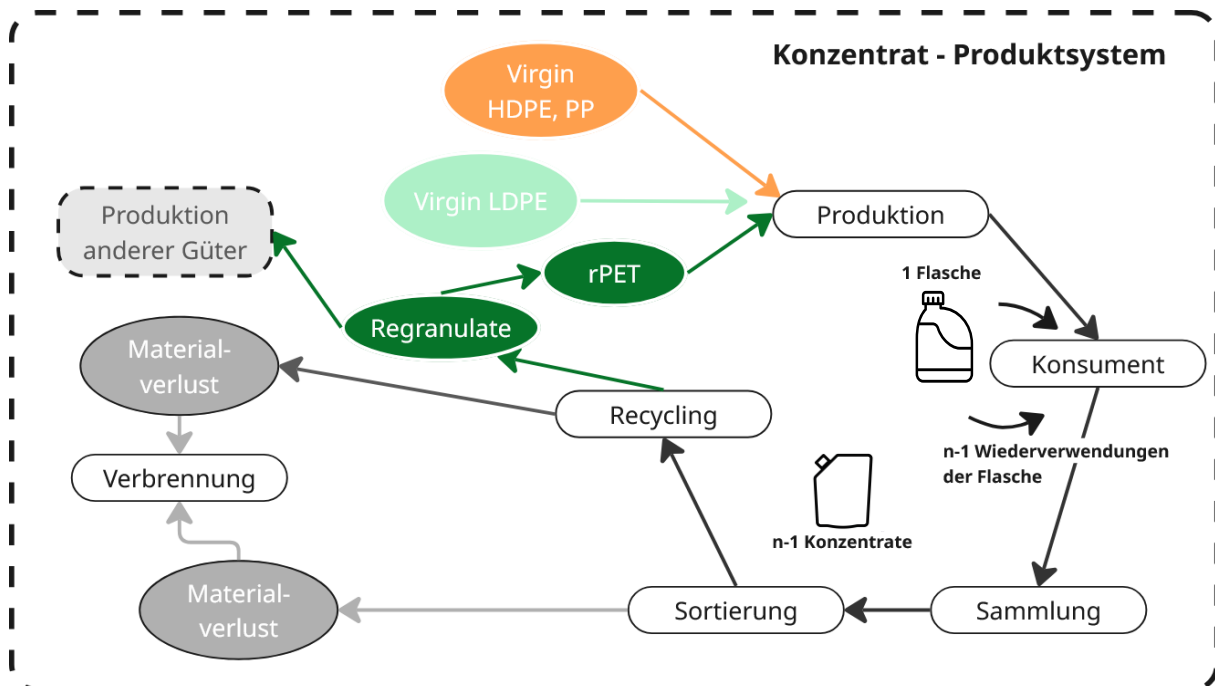


Abbildung 6: Schematische Darstellung des Produktsystems des Spülmittelkonzentrats (eigene Darstellung, Produktbilderquelle: www.pril.de)



In Abbildung 5 bedeutet „n“ die variable Anzahl an Flaschen, die im konventionellen Produktsystem verbraucht werden (bzw. deren Inhalt). Entsprechend werden in dem Produktsystem „n-1“ Konzentrate benötigt, um den gleichen Spülmittelverbrauch zu erzielen, sowie eine Flasche, die (n-1)-mal wiederverwendet wird. Laut Herstellern gibt es keine Begrenzung, wie oft die Flasche wiederverwendet werden kann. Das beim Recycling entstehende PET-Regranulat kann wieder für die Produktion einer neuen Spülmittelflasche eingesetzt werden. In diesem Fall würde es sich um einen geschlossenen Kreislauf handeln, was als „closed-loop“ bezeichnet wird, welcher aber aufgrund von Qualitäts- und Materialverlusten i. d. R. nicht erreicht wird (Klotz, 2023). Alternativ könnte es im Falle eines „open-loop“ zur Produktion eines anderen Produkts verwendet werden. Für die anderen Kunststoffarten wird ebenfalls angenommen, dass ein open-loop Recycling stattfindet.

3.3.3 Durchführung einer LCA im Kontext von CE an der Fallstudie „Spülmittelkonzentrat“

Eine übersichtliche Anleitung zur Durchführung von Ökobilanzierungen bietet die ISO (2021a). Dieses Kapitel beinhaltet eine Anwendung der darin enthaltenen Prinzipien im CE-Kontext anhand der ausgewählten Fallstudie.

Der erste Schritt jeder Ökobilanzierung ist die Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens. Das Ziel dieser Studie ist es im Rahmen einer C-LCA bzw. Kreislaufwirtschaftsbewertung zu untersuchen, welches der beiden Spülmittel-Produktsysteme zu einer nachhaltigeren Kreislaufwirtschaft beitragen. Eins der beiden Produktsysteme (das Spülmittelkonzentrat) versucht einige R-Strategien zu adressieren. Daher kann anhand dieser vergleichenden Analyse auch untersucht werden, wie sich die verschiedenen R-Strategien auf die Zirkularität und Umweltauswirkungen der Systeme auswirken. Es wird ein attributiver LCA-Ansatz angewandt nach welchem die umweltrelevanten physikalischen Input- und Output-Ströme eines Lebenszyklus und seiner Teilsystemen beschrieben werden (Finnveden et al., 2009). Zudem wird eine Szenario-Analyse durchgeführt, um den Einfluss verschiedener Nutzungspraktiken, Verpackungsdesigns und Rezyklateinsatzquoten zu ermitteln. Um transparente Ergebnisse zu gewährleisten, wurde für die Datenerhebung eine Mischung aus Bestandsdatenbanken, Literaturquellen und Annahmen verwendet. Eine detaillierte Anleitung für die Erhebung von CE-Daten befindet sich im Meilenstein-Dokument 3.1.1 „Leitfaden zur Datengewinnung“.

Für einen Produktvergleich ist es wichtig, dass die funktionelle Einheit sowie die damit verbundenen methodischen Entscheidungen für beide verglichenen Produktsysteme identisch bzw. konsistent sind. Die funktionelle Einheit beschreibt dabei die quantifizierte Leistung oder Funktion eines Produktsystems, die als Bezugsgröße für die Umweltbewertung dient und so Vergleichbarkeit zwischen alternativen Lösungen ermöglicht (ISO, 2021a). Um die funktionelle Einheit festzulegen, bietet es sich an bisherige Literatur zu ähnlichen Fallstudien zu Rate zu ziehen. Orientiert an LCA-Studien für Spülmittel wird die Einheit „manuelles Geschirrspülen im Haushalt von 180 Gedecken, engl. Place Settings (PS)“ festgelegt (Golsteijn et al., 2015; Stamminger et al., 2007). Ein Gedeck ist ein komplettes Set aus Geschirr, Besteck und Gläsern für eine Person bei einer Mahlzeit, einschließlich eines Suppentellers, Esstellers, Dessertteller, Tasse, Untertasse, Glas, Gabel, Suppenlöffel, Messer, Teelöffel, Dessertlöffel. Basierend auf Studien zum Verbrauchsverhalten von Spülmitteln werden für die Reinigung von 180 Gedecken 450 ml Geschirrspülmittel benötigt (Golsteijn et al., 2015). Dies entspricht dem Produktvolumen bzw. einer Einheit der Spülmittelflasche und des mit Wasser gemischtem Spülmittelkonzentrats. Folglich sind die beiden Referenzflüsse 450 ml Spülmittel und 120 ml Konzentrat gemischt mit 330 ml Wasser (äquivalent zu 450 ml Spülmittel).



Die Studie verfolgt einen Cradle-to-Cradle-Ansatz, der alle Stufen von der Rohstoffgewinnung bis hin zum EoL umfasst (Hauschild et al., 2018). Die **Systemgrenzen** schließen somit folgende Prozesse der beiden Produktsysteme ein:

- *Rohstoffgewinnung*: Beschaffung und Verarbeitung von Primär- sowie von Sekundärmaterialien.
- *Herstellung*: Herstellungsprozesse zur Produktion von Geschirrspülmitteln, zur Herstellung von Verpackungskomponenten und schließlich die Abfüllung und der Verschluss.
- *Nutzungsphase*: Das manuelle Geschirrspülen und die damit verbundenen Inputs, wie Wasser- und Energienutzung.
- *EoL*: Abfallsammlung, -sortierung und -verwertung, sowohl mechanisches Recycling als auch Energierückgewinnungsverfahren. Hierbei werden closed-loop und open-loop Recycling berücksichtigt.
- *Transport*: Transporte von Materialien und Waren zwischen Lieferanten, Herstellern, Einzelhändlern und EoL-Anlagen.

Der Transport zwischen Supermarkt und Verbraucher wird abgeschnitten und nicht berücksichtigt, da angenommen wird, dass die Distanz vernachlässigbar gering ist. Eine Visualisierung der Systemgrenzen für das Produkt „konventionelle Spülmittelflasche“ ist in Abbildung 5 zu finden, während die Systemgrenzen für die Produktbetrachtung des „Spülmittelkonzentrats“ in Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.⁶ beschrieben sind.

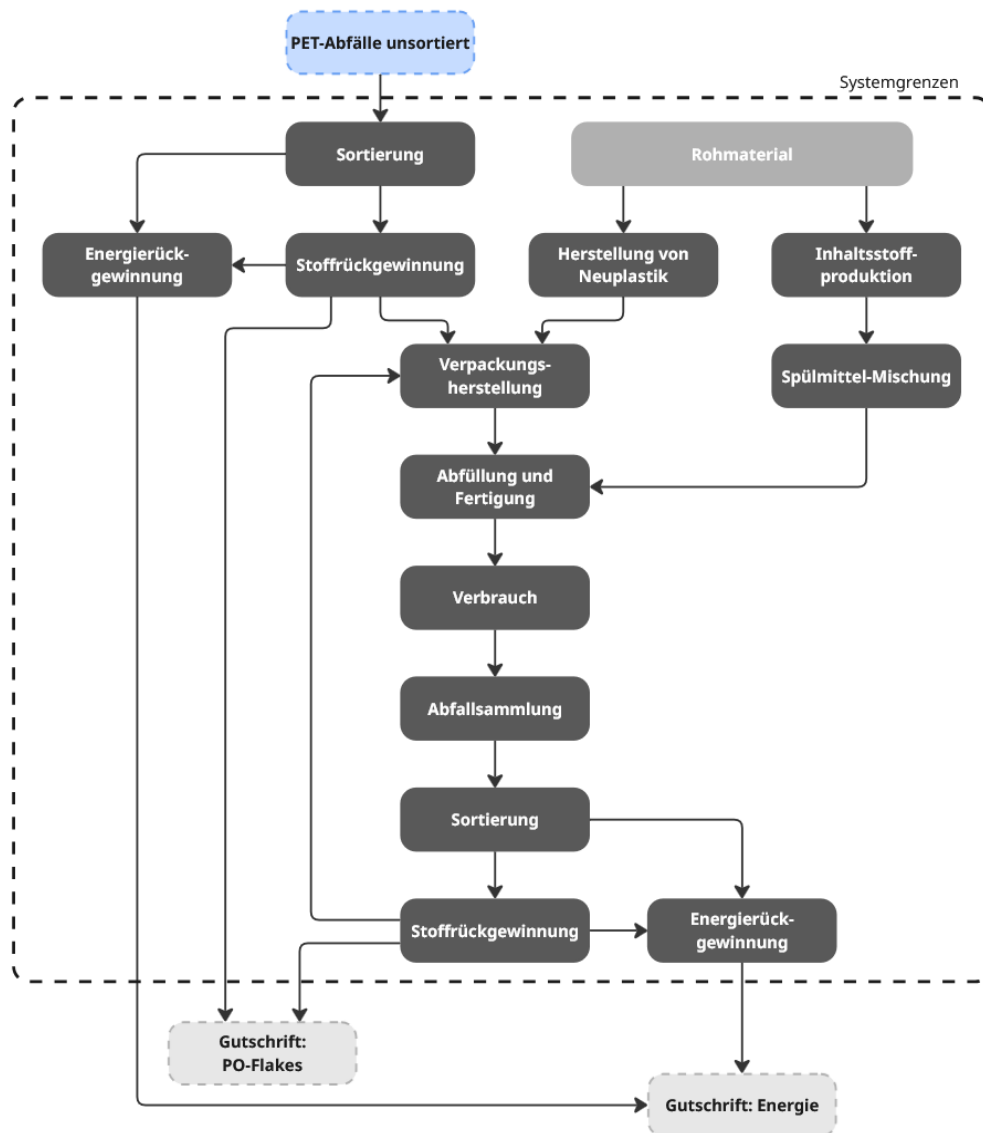


Abbildung 7: Systemgrenzen des untersuchten Produkts „konventionelle Spülmittelflasche“

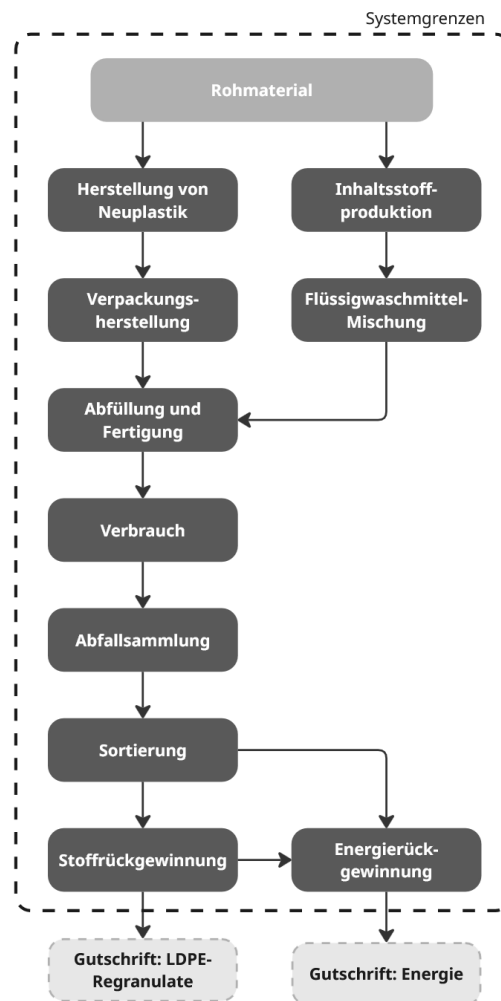


Abbildung 8: Systemgrenzen des untersuchten Produkts „Spülmittelkonzentrat“

Beide Produktsysteme beinhalten EoL-Prozesse bei denen Kunststoffrezyklate erzeugt werden, die z. T. nicht innerhalb des Produktsystems wiedereingesetzt werden, sondern einen potenziellen Rohstoffinput für andere Produktsysteme darstellen. Hier stellt sich die Frage, in welchem Umfang die Aufwendungen für die Rezyklatherstellung dem untersuchten Produktsystem (EoL) zugeschrieben werden sollten. Diese Frage kann durch die Nutzung verschiedener Allokationsmethoden beantwortet werden (detaillierte Beschreibungen siehe Kapitel 3.3.1). Welche Methodik am geeignetsten für unsere Fallstudie ist, kann anhand verschiedener Auswahlkriterien bestimmt werden (siehe Tabelle 1 und Tabelle 2). Ein erster Schritt zur Orientierung ist i. d. R. die Untersuchung verwandter Arbeiten und der darin angewandten Methodiken. Eine Übersicht zu genutzten Allokationsmethoden in verwandten Arbeiten befindet sich in Tabelle 17 im Anhang B. Aus der Tabelle wird allerdings ersichtlich, dass die Wahl der Allokationsmethode in hohem Maße von dem Kontext und den Zielen der Studie abhängt und in den verwandten Arbeiten stark variiert. Die ISO 14044 empfiehlt daher Allokationen soweit möglich durch Systemerweiterungen zu vermeiden. Falls dies nicht möglich ist, sollten Allokationen basierend auf physikalischen Eigenschaften, wie den Produktmassen, bevorzugt durchgeführt werden. Daher wird für die Fallstudie weitestgehend die Methode der Systemerweiterung angewendet, bei der das System um die vor- und nachgelagerten Recyclingprozesse erweitert wird. Sofern innerhalb des betrachteten Kreislaufrs mehr Rezyklat eingesetzt als produziert wird, wird der net-scrap-Ansatz angewandt.



Das bedeutet, dass das Recycling zur Produktion der Netto-Rezyklat-Differenz als vorgelagerten Prozess modelliert wird, um sicher zu stellen, dass die daraus entstehenden Umweltbelastungen im untersuchten Produktsystem berücksichtigt werden. Es werden zudem Gutschriften aus produzierten Sekundärmaterialien und erzeugter Energie berücksichtigt.

Zur Berechnung der Umweltauswirkungen der beiden Produktsysteme wird die ReCiPe 2016 v1.03 Midpoint-Methode verwendet mit der LCA-Software OpenLCA (Huijbregts et al., 2016). Diese Methode umfasst eine Vielzahl von Midpoint-Umweltauswirkungskategorien und bietet somit ein umfassendes Bild der ökologischen Auswirkungen des Produkts. Welche Umweltauswirkungskategorien im Detail berücksichtigt werden sollten ist abhängig von der Zielstellung der Untersuchung und dem betrachteten Produktsystem. Zunächst empfiehlt es sich die Ergebnisse für alle Umweltauswirkungskategorien zu sichten und sich auf signifikante Differenzen zu fokussieren. So können Umweltauswirkungskategorien, die keine wesentlichen Unterschiede zwischen den beiden Produktsystemen aufweisen ggf. für eine tiefgreifendere Analyse ausgeschlossen werden, um klarere und übersichtlichere Ergebnisse zu erhalten, welche nur die entscheidenden Unterschiede demonstrieren. Zudem können verwandte Arbeiten bereits Hinweise dazu liefern, welche Umweltindikatoren innerhalb dieses Sektors insbesondere relevant sind.

Die ökologischen Auswirkungen der beiden untersuchten Produkte werden zunächst unabhängig voneinander ermittelt, um die Auswirkungen beider Produkte direkt miteinander vergleichen zu können. Anschließend wird die Kombination beider Produkte analysiert, da vom Hersteller vorgesehen ist, dass die Spülmittelflasche, nachdem der Inhalt aufgebraucht wurde, wieder mit dem Spülmittelkonzentrat aufgefüllt wird. Zusätzlich wird eine Reihe von Szenario- und Sensitivitätsanalysen durchgeführt, um die wichtigsten Einflussfaktoren in den verschiedenen Lebenszyklusphasen zu identifizieren und um zu untersuchen, inwiefern getroffene Annahmen die Aussagekraft der Endergebnisse beeinflussen. Es wird eine Szenarioanalyse auf Grundlage der Anzahl der Nachfüllzyklen durchgeführt. Für jedes Szenario werden die Auswirkungen auf das Gesamtproduktsystem bewertet und verglichen. Um den Einfluss der unterschiedlichen Verpackungsdesigns (Flasche und Standbodenbeutel) und der Anzahl der Wiederverwendungszyklen auf die Umweltauswirkungen zu bestimmen, werden diese zusätzlich zur Analyse des gesamten Produktsystems auch losgelöst von dem Produktinhalt betrachtet. Des Weiteren wird untersucht, wie sich die Varianz des Rezyklatanteils im Flaschenkörper auf die Umweltauswirkungen auswirkt (siehe Tabelle 4).



Tabelle 4: Übersicht aller Parametervariationen im Rahmen der Szenario- und Sensitivitätsanalyse

Szenarioanalyse Sensitivitätsanalyse	Parametervarianz
Akzeptanz der Wiederverwendung (Anzahl Nachfüllzyklen)	Durchschnittliche Anzahl d. Nachfüllzyklen = n (i) $n = 0$ (ii) $n = 0,5$ (iii) $n = 1$ (vi) $n = 1,5$ (v) $n = 3$ (vi) $n = 5$
Rezyklatanteile im Flaschenkörper	(i) 50 % (ii) 75 % (iii) 100 %
Transportdistanzen	alle auf (i) 50 km (ii) 100 km (iii) 200 km

Im Rahmen der Sensitivitätsanalyse werden die Einflüsse der Transportdistanzen untersucht. Ergänzend hierzu könnte z. B. auch der Energiemix variiert werden, da dieser sich in Deutschland perspektivisch ändern wird und i. d. R. einen großen Einfluss auf die Umweltauswirkungen hat (BMWE, 2025; Pellengahr et al., 2023; Vlasopoulos et al., 2023). Weitere Aspekte, die für eine umfassende Analyse genauer untersucht und variiert werden könnten sind z. B. das Nutzerverhalten (sparsam vs. verschwenderisch), das Entsorgungsverhalten der Nutzer oder die Effizienz der EoL-Prozesse (Sortierung und Aufbereitung).

3.3.4 Ergebnisse und Diskussion der LCA der Fallstudie Spülmittelkonzentrat

Um eine Grundlage für die folgenden Szenario- und Sensitivitätsanalysen zu schaffen, wird zunächst eine umfassende Untersuchung der Referenzproduktsysteme vorgenommen. Dazu gehören: (i) das herkömmliche Spülmittel in einer PET-Flasche; (ii) der zugehörige Nachfüllbeutel; und (iii) ein kombiniertes System, das eine Einheit der PET-Flasche und eine Einheit des Spülmittels umfasst, die auf dieselbe funktionale Einheit wie die einzelnen Systeme normiert sind. Der Vergleich wird auf Grundlage von skalierten Umweltauswirkungswerten durchgeführt (für jede Auswirkungskategorie wird ein Höchstwert von eins festgelegt) um eine Kategorie übergreifende Interpretation zu erleichtern.

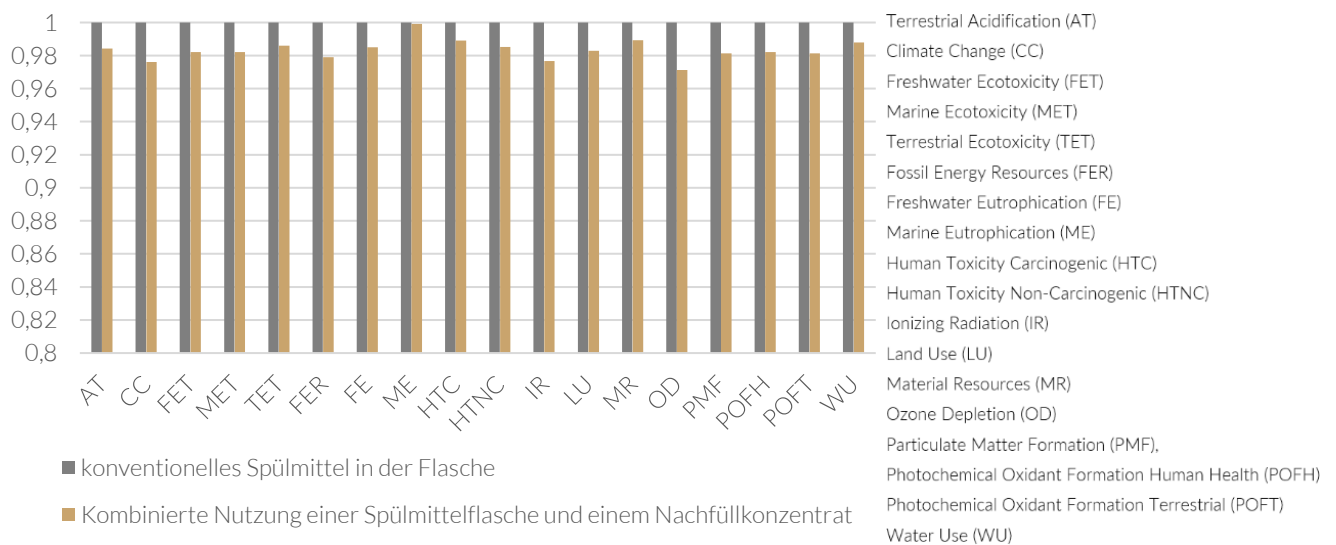


Abbildung 9: Vergleich der skalierten Umweltauswirkungen der Referenzproduktsysteme (gesamt)

Wie in Abbildung 8 zu sehen ist, weist das Spülmittelkonzentrat im Vergleich zum konventionellen Spülmittel und deren Kombination, in allen Kategorien durchweg niedrigere Werte auf. Der Unterschied ist jedoch eher marginal und liegt im Durchschnitt etwa bei 4 % unter den Umweltauswirkungen des konventionellen Spülmittels. Dies ist darauf zurückzuführen, dass im Rahmen der Analyse der gesamten Produktsysteme, die Umweltauswirkungen der Nutzungsphase überwiegen mit ca. 85 % (siehe Abbildung 9). Dadurch sind die Unterschiede innerhalb der Herstellungsprozesse und des EoL weniger deutlich zu erkennen. Eine Darstellung der prozentualen Beiträge der verschiedenen Lebenszyklusphasen an den Gesamtumweltauswirkungen ist in Abbildung 9 exemplarisch für das konventionelle Spülmittel abgebildet.

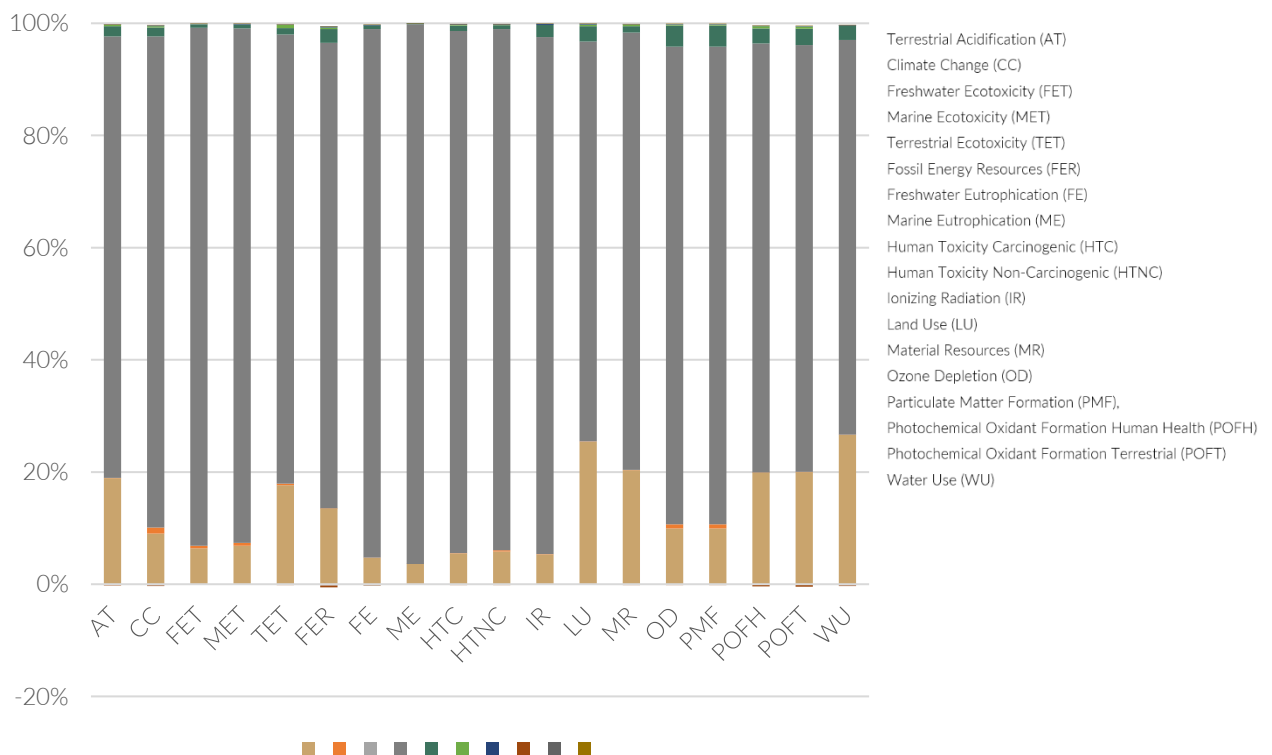


Abbildung 10: Prozentuale Beiträge der Lebenszyklusphasen zu den Umweltauswirkungen des gesamten Produktsystems des konventionellen Spülmittels

Um den Unterschied der Umweltauswirkungen der verschiedenen Verpackungsdesigns über deren gesamten Lebenszyklus klarer visualisieren zu können, wird der Produktinhalt und dessen Nutzung für bestimmte Analysen aus der Betrachtung ausgeschlossen. Die Ergebnisse für die Verpackungssysteme, die in Abbildung 10 dargestellt sind, zeigen einen viel deutlicheren Kontrast als zuvor die Gesamtbetrachtung.

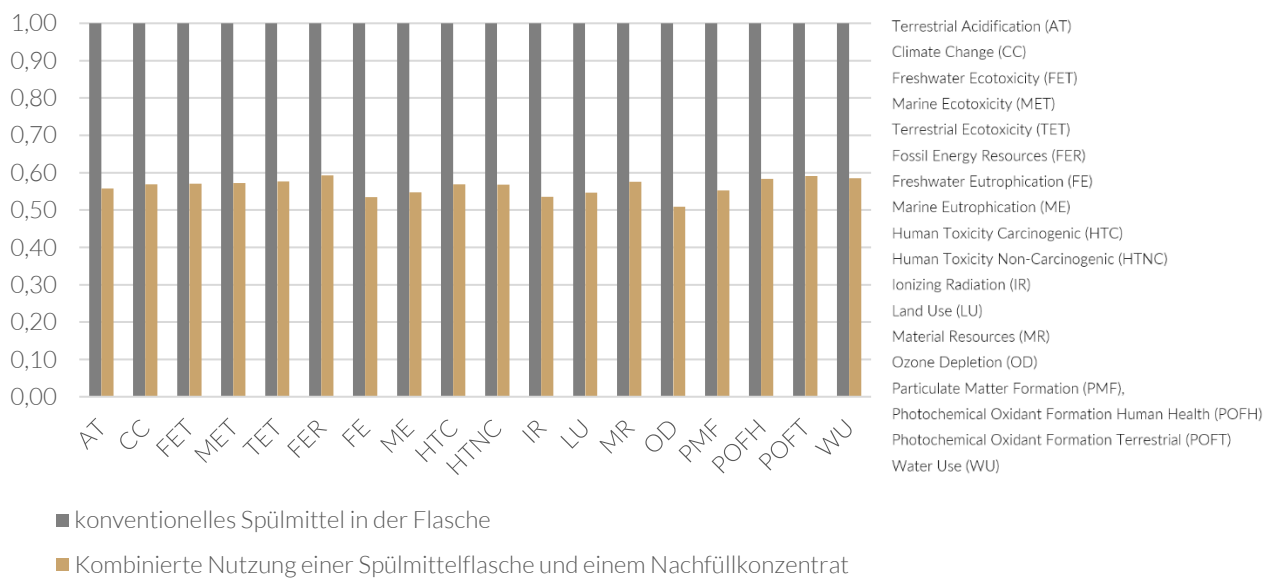


Abbildung 11: Vergleich der skalierten Umweltauswirkungen der Referenzproduktsysteme (nur Verpackungen betrachtet)

Eine signifikante Verringerung aller Umweltauswirkungen ist für das Spülmittelkonzentrat zu beobachten. Im Durchschnitt betragen die Umweltauswirkungen des Nachfüllbeutels in allen Kategorien nur 15 % im Vergleich zur PET-Flasche (100 %). Zurückzuführen sind diese Ergebnisse u. a. darauf, dass deutlich weniger Kunststoffmaterial zur Herstellung des Standbodenbeutels (4,8 g) im Vergleich zur Flasche (29,2 g) benötigt wird. Die Kombination liegt mit einem Wert von weniger als 60 % im Vergleich zum konventionellen Spülmittel im Mittelfeld. Dies unterstreicht die erheblichen Umweltvorteile des Nachfüllbeutels, wenn nur die Verpackung bewertet wird.

Die folgende **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**¹¹ zeigt die Beiträge der verschiedenen Prozesse zu den gesamten Umweltauswirkungen der Spülmittelflasche. Obwohl in allen Kategorien noch Nettobelastungen auftreten, wird deutlich sichtbar, dass sowohl die energetische als auch die stoffliche Verwertung insgesamt einen positiven Einfluss haben. Dies unterstreicht, wie wichtig es ist, Verwertungsprozesse nicht nur nach ihrem Aufwand und ihren Kosten zu bewerten, sondern auch die dadurch entstehenden Sekundärprodukte und deren ökologische Gutschriften zu berücksichtigen.

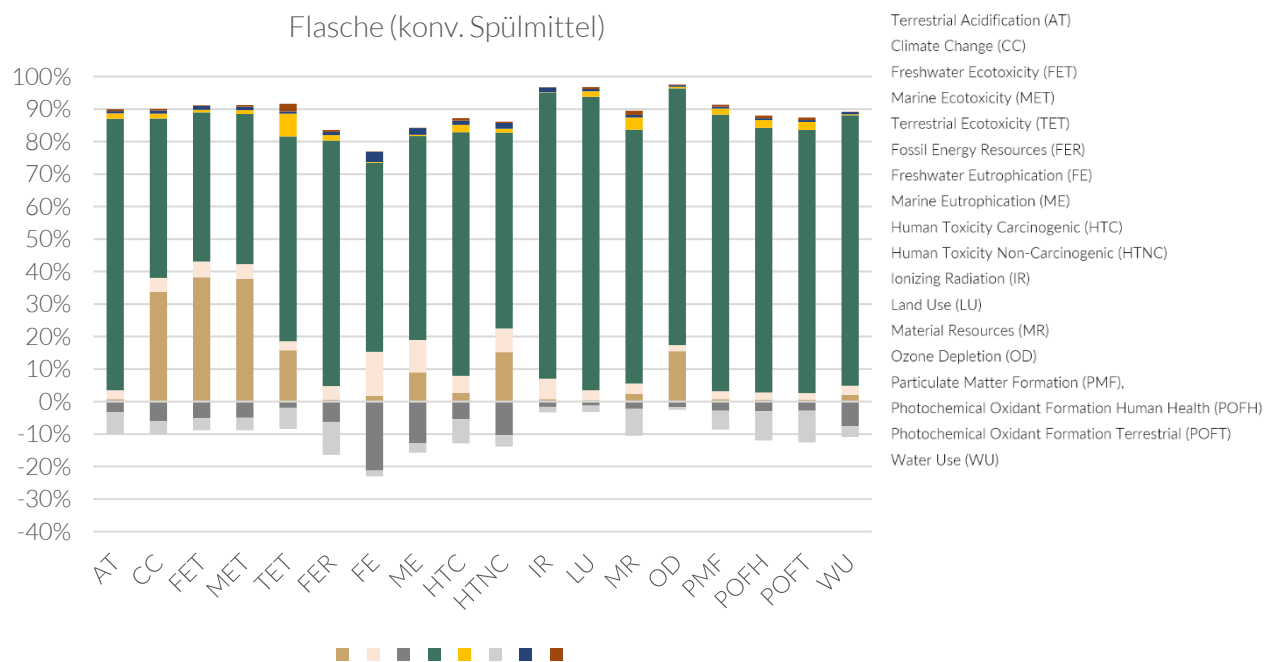


Abbildung 12: Prozentuale Beiträge der Lebenszyklusphasen zu den
Umweltauswirkungen der Spülmittelflasche

Insgesamt sind die Herstellungsprozesse die Hauptverursacher der Umweltauswirkungen der Verpackungsproduktsysteme. Die Abfallsammlung und die Transporte sind die Prozesse, die i. d. R. die geringsten ökologischen Auswirkungen innerhalb des Verpackungslebenszyklus haben.

Eine Variation des Verbraucherverhaltens wird untersucht, indem die Anzahl der Wiederverwendungen und des Wiederauffüllens der Flasche auf bis zu 5 erhöht wird. In Anbetracht des geringen Unterschieds zwischen dem kombinierten Referenzfall und dem konventionellen Spülmittel im Rahmen der Gesamtprodukt-Betrachtung fokussiert sich die Untersuchung auf den Lebenszyklus der Verpackungen. Die Ergebnisse dieser Analyse sind in Abbildung 12 dargestellt.

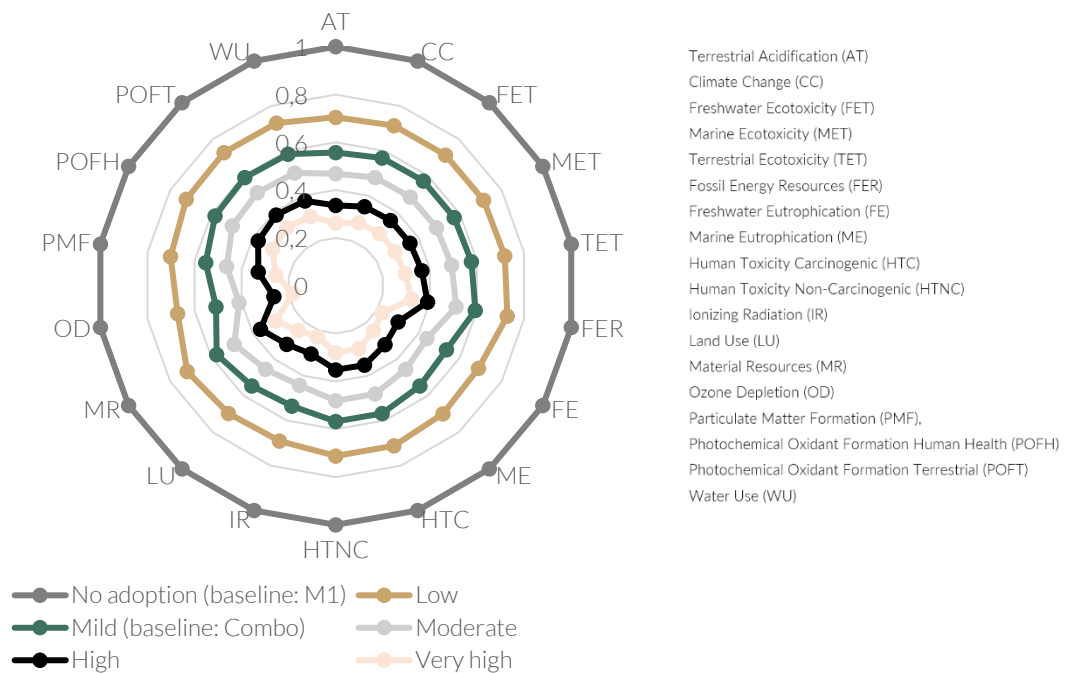


Abbildung 13: Szenarioanalyse für verschiedene durchschnittliche Wiederverwendungszyklen (n) bzw. -bereitschaften der Nutzer

Wie zu erwarten, wirkt sich eine hohe Bereitschaft dazu, dieselbe Flasche wieder zu befüllen, positiv auf die Umweltauswirkungen der Produktsysteme aus (in allen Kategorien), da so weniger Verpackungsmasse entsorgt werden muss. Neben der Anzahl der Wiederverwendungszyklen wird untersucht, wie sich der Rezyklatanteil der PET-Flasche auf die Umweltauswirkungen des konventionellen Spülmittel-Produktsystems auswirkt. Im Referenzszenario wird ein Rezyklatanteil von 75 % angenommen. Als Alternativen werden 50 % und 100 % angenommen. Da die PET-Flasche einen geringen Einfluss auf das Gesamtproduktsystem hat, wird der Produktinhalt erneut bewusst ausgeschlossen. Die entsprechenden LCIA-Ergebnisse sind in Abbildung 13 dargestellt.

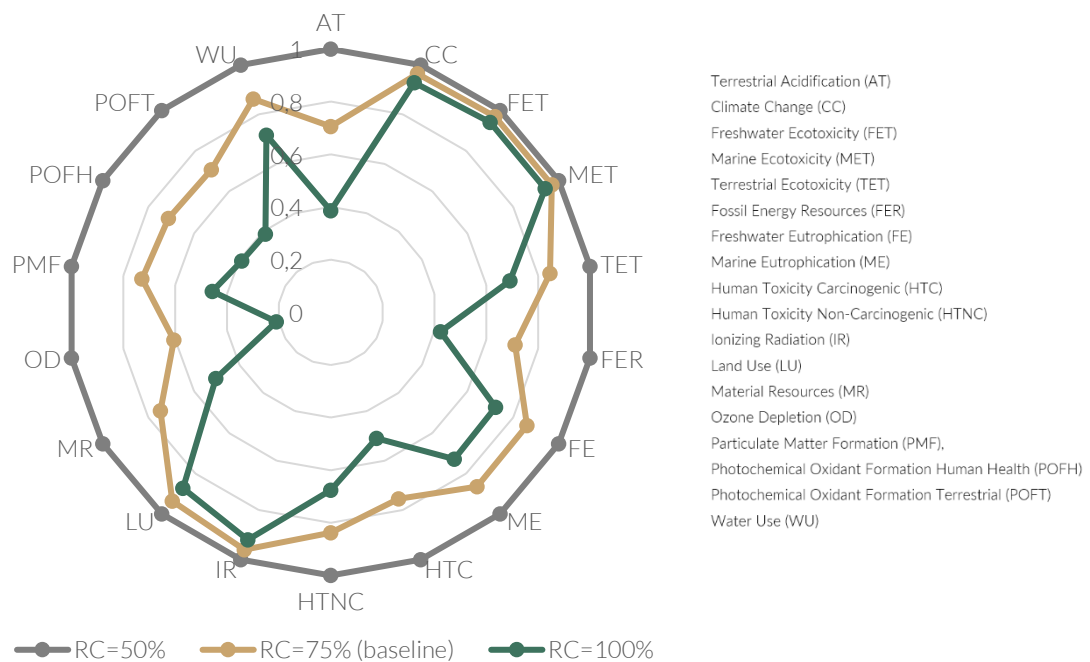


Abbildung 14: Sensitivitätsanalyse des Rezyklatgehalts der Spülmittelflasche

Die Umweltauswirkungen reagieren sehr empfindlich auf Schwankungen des PET-Recyclinganteils und sind in den einzelnen Wirkungskategorien sehr unterschiedlich. Während fünf Kategorien - darunter CC, IR und FET - nur marginale Veränderungen aufweisen, reagieren mehrere andere stärker. Insbesondere AT, HTC, OD, POFH und POFT weisen eine Verringerung um fast 50 % auf, wenn der Rezyklatgehalt von 75 % auf 100 % erhöht wird. Das bedeutet, dass beim Verpackungsdesign von PET-Flaschen ein möglichst hoher Rezyklatanteil angestrebt werden sollte, um dessen ökologische Auswirkungen zu minimieren.

Abschließend wird die Sensitivität der Ökobilanzergebnisse in Bezug auf die angenommenen Transportentfernungen zwischen Produktion, Supermarkt und EoL-Anlagen untersucht. Die Grundannahme liegt bei 100 km für jede Transportaktivität innerhalb des Produktsystems. Um die Sensitivität der Ergebnisse gegenüber dieser Annahme zu bewerten, wurden die Transportentfernungen durch Halbierung (50 km) und Verdoppelung (200 km) des Referenzwerts variiert. Die Analyse wird für beide Produkte (Spülmittelflasche und Konzentrat) unter Gesamt- und ausschl. Verpackungsbetrachtung angewendet. Da sich die Transportdistanzenvariationen auf beide Produktsysteme ähnlich auswirken, sind in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** exemplarisch nur die Ergebnisse für die Spülmittelflasche dargestellt.

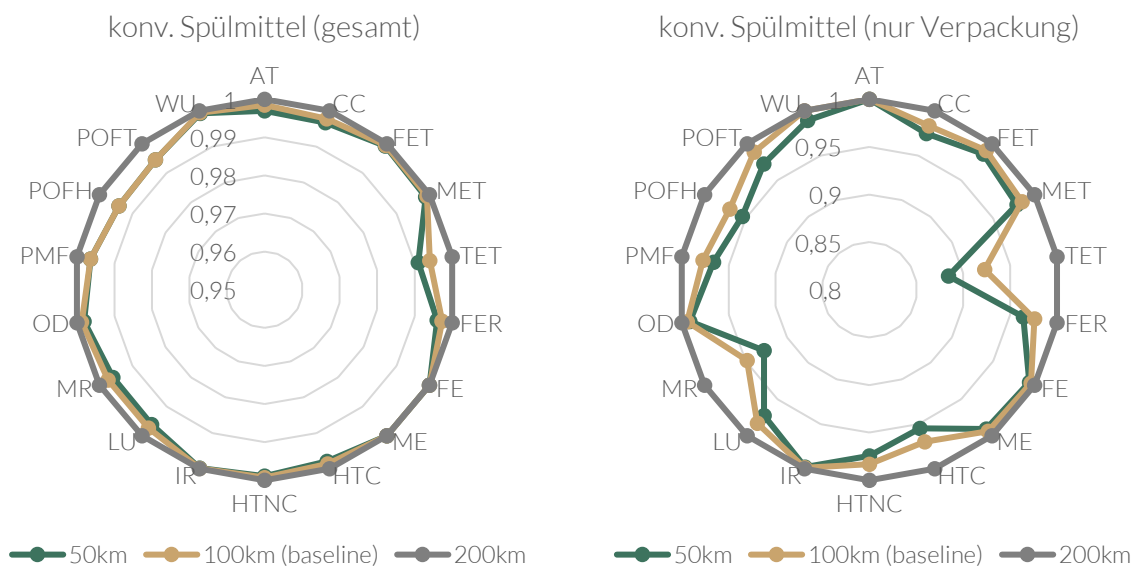


Abbildung 15: Sensitivitätsanalyse der Transportdistanzen für das konventionelle Spülmittel

Wie aus Abbildung 15 hervorgeht, hat die Variation der Transportentfernung einen marginalen Einfluss auf das Gesamtauswirkungsprofil, und zwar sowohl in der Gesamt- als auch im Rahmen der aussch. Verpackungsbetrachtung. Sowohl bei dem Spülmittelkonzentrat als auch bei dem konventionellen Spülmittel bleiben die Änderungen der Auswirkungswerte unter 1 % (bei der Gesamtbetrachtung). Beim Fokus auf die Lebenszyklen der Verpackungen ist der Einfluss etwas ausgeprägter allerdings immer noch gering, mit weniger als 4 % Abweichung innerhalb von 16 Auswirkungskategorien. Lediglich bei TET und MR ergeben sich Abweichungen von über 10 %. Insgesamt deuten die Ergebnisse dennoch darauf hin, dass die Transportdistanzannahme einen eher marginalen Einfluss auf die gesamten Umweltbelastungen der untersuchten Produktsysteme hat.



3.4 Zirkularitätsbewertung als Komponente der Kreislaufwirtschaftsbewertung von Produkten

Zusätzlich zu einer Ökobilanzierung wird für eine Kreislaufwirtschaftsbewertung die Verwendung verschiedener Zirkularitätsindikatoren empfohlen (ISO, 2024a; Luthin et al., 2023). Zirkularitätsindikatoren sind qualitative oder quantitative Variablen die einen Einblick in die „Zirkularitätsperformance“ von Systemen, Maßnahmen oder Produkten geben sollen (Saidani et al., 2019). Sie dienen als Instrumente für die Bewertung, Kommunikation und Überwachung in verschiedenen Kontexten. Sie zielen darauf ab, den Fortschritt in Richtung der CE-Ziele zu verfolgen, indem sie Aspekte wie Materialflüsse, Produktdesign, Ressourcenintensität und Wiederverwendungspotenzial ermitteln und bewerten (Oliveira et al., 2021). In diesem Abschnitt wird eine Auswahl an CE-Indikatoren vorgestellt. Anschließend werden anhand der Fallstudie sowohl fallspezifisch relevante als auch generische Ansätze zur Zirkularitätsbewertung aus bestehender Literatur identifiziert, vorgestellt und angewendet.

3.4.1 Stand der Forschung zur Zirkularitätsbewertung von Produkten

Die Auswahl der geeigneten Indikatoren ist grundsätzlich abhängig von dem spezifischen Anwendungsfall und der Zielstellung der Bewertung, also z. B. die Forschungsfrage, die beantwortet werden soll (Ahmed et al., 2022b; Pauliuk, 2018; Saidani et al., 2019). Aufgrund der Vielfalt an Produkten, Bewertungszielen und -umfängen ist das Vorschreiben eines fallunspezifischen Indikatorensets sehr herausfordernd. Daher gibt es verschiedene Studien, die zum Ziel haben den Auswahlprozess zu unterstützen von Indikator-Klassifikationen und Kriterien bis hin zu Schritt-für-Schritt-Anleitungen.

Moraga et al. (2019) haben bspw. 20 CE-Indikatoren hinsichtlich der CE-Strategien, die adressiert werden, klassifiziert. Eine Erkenntnis daraus ist, dass die meisten untersuchten Indikatoren auf Materialrückgewinnungsstrategien wie Recycling fokussieren. Währenddessen ermöglicht keiner der Indikatoren die Bewertung bzw. Berücksichtigung von Sharing-Konzepten, neuen multifunktionellen Produkten oder Produktredundanz. Im Allgemeinen wird davon abgeraten einen einzelnen Indikator für eine CE-Bewertung zu nutzen, sondern empfohlen, CE-Indikatorensets zu verwenden (Moraga et al., 2019). Weitere Kategorisierungen von CE-Indikatoren werden von Oliveira et al. (2021) und Kristensen und Mosgaard (2020) vorgeschlagen. Oliveira et al. (2021) haben hierfür zunächst eine systematische Literaturrecherche durchgeführt, um u. a. herauszufinden, welche Lebenszyklusphasen von den untersuchten Indikatoren analysiert werden. Die Ergebnisse zeigen, dass die meisten Indikatoren eine komplette Lebenszyklus-Zirkularitätsbewertung ermöglichen, allerdings auch hier wieder mit dem Schwerpunkt auf Material- und Energierückgewinnungsstrategien (Oliveira et al., 2021). Die meisten von Oliveira et al. (2021) untersuchten Indikatoren adressieren die ökologische und ökonomische Dimension der Nachhaltigkeit, was den Ergebnissen des Mappings von Kristensen und Mosgaard (2020) ähnelt. Gleichmaßen bemerken sie, dass die überprüften Indikatoren sich überwiegend mit dem EoL beschäftigen und selten Konzepte wie Lebensdauererweiterung, Demontage oder Ressourcen-Effizienz thematisieren (Kristensen & Mosgaard, 2020). (Ahmed et al., 2022b) haben ein Rahmenwerk entwickelt, welches eine Schritt-für-Schritt-Anleitung zum Indikatoren-Auswahl-Prozess beinhaltet für verschiedene CE-Ebenen.



Ähnlich dazu haben Saidani et al. (2019) als Hilfestellung zur fallspezifischen Indikatorenauswahl eine Taxonomie entwickelt, die 55 Indikatoren nach den folgenden 10 Kategorien klassifiziert:

1. die Systemebene, engl. „levels“ (Mikro-, Meso-, Makroebene) (Kirchherr et al., 2017)
2. die berücksichtigten R-Strategien bzw. „loops“ (Wiederverwendung, Wiederaufbereitung usw.) (EMF & Granta, 2019)
3. die Performance (intrinsische oder eine indirekt resultierende Zirkularität) Einige CE-Indikatoren messen die inhärente Zirkularität (z. B. die Kreislauffähigkeit von Ressourcen), während andere die Folgen von CE-Schleifen (z. B. auf die Nachhaltigkeit) abbilden.
4. Perspektive (tatsächliche oder potenzielle Zirkularität, abhängig davon, ob eine CE-Maßnahme retrospektiv oder prospektiv bewertet werden soll)
5. Verwendungszweck, bzw. „usages“ (handlungsorientierte Indikatoren, die Entscheidungsträgern bei der Formulierung klarer Ziele und Strategien helfen, oder informationsorientierte Indikatoren, die den Entscheidungsträgern helfen, die aktuelle Situation zu verstehen)
6. die Transversalität (sektorspezifisch oder generisch)
7. Dimension - eine niedrige Dimensionalität, d. h. eine Überführung der Kreislauffähigkeit in eine einzige Zahl, ist für die Entscheidungsfindung von Managern nützlich (Linder et al., 2017) , während eine hohe Dimensionalität einen höheren Informationsgehalt bieten kann, der für Experten, z. B. Hersteller oder Ingenieure, bei der Bewertung der Kreislauffähigkeit von Produkten besser geeignet ist (Saidani et al., 2017).
8. die Maßeinheit, engl. „unit“ (qualitativ oder quantitativ)
9. das Format des mit den CE-Indikatoren verbundenen Bewertungsrahmens, um ihre Berechnung zu erleichtern. CE-Indikatoren werden entweder mit Formeln manuell berechnet oder mit einem Berechnungstool (einschließlich dynamischer Excel-Tabellen, webbasierter Tools oder anderer Software).
10. Quellen, engl. „sources“ der Indikatoren (da der Entwicklungshintergrund einen Einfluss z. B. auf die Anforderungen auf wissenschaftliche Validität hat Unterscheidung zwischen akademisch, Industrie / Beratungsagentur und staatlichen / umweltorientierten Organisationen)

Daran anknüpfend wurde ein Excel-basiertes Tool bereitgestellt, welches Nutzende bei der Auswahl relevanter Indikatoren unterstützt, unter Eingabe der zutreffenden Optionen für die jeweiligen Kategorien (Saidani et al., 2019). Luthin et al. (2023) wendet sechs der zehn Kategorien von Saidani für das Screening von 133 CE-Indikatoren und Indikatorensets an, um geeignete CE-Indikatoren für die Integration in ein C-LCA Rahmenwerk zu identifizieren. Die Anforderungen hierbei sind, dass nur quantitative, transparente, multidimensionale und generische Mikro- und Nano-Ebenen-Indikatoren berücksichtigt werden, die mindestens drei R-Strategien adressieren. Zudem sollte die intrinsische Performance bewertet werden, um Überlappungen mit den Umweltauswirkungskategorien aus der LCA zu vermeiden. Folgende Indikatoren erfüllen alle von Luthin et al. (2023) angewandten Kriterien:

- Material Circularity Indicator [MCI] (EMF & Granta, 2019)
- Material Efficiency Metric [MEM] (Brandström & Eriksson, 2022)
- Product Circularity Indicator [PCI] (Bracquené et al., 2020)
- Longevity Indicator [LI] (Franklin-Johnson et al., 2016)



Der MCI wird als Mindestanforderung für das C-LCSA Rahmenwerk festgelegt, aufgrund seiner simplen Anwendung und weiter Verbreitung in bisherigen wissenschaftlichen Studien (Luthin et al., 2023). Moraga et al. (2019) schlagen ebenfalls die Nutzung des MCIs für die Bewertung von Produktwiederverwendung, Recycling, Abfallmanagement und Energierückgewinnung vor. Auch Kristensen und Mosgaard (2020) identifizieren den MCI neben weiteren Indikatoren, wie dem Circular Economy Indicator Prototype (CEIP) (Cayzer et al., 2017) als einen multidimensionalen Indikator, der mit LCA kombiniert werden kann.

Der MCI ist ein quantitativer Indikator, der von der Ellen MacArthur Foundation entwickelt wurde. Er misst den Grad der Kreislauffähigkeit von Produkten, indem er den Einsatz von Neumaterialien, das Recycling, die Produktlebensdauer und den Nutzen des Produkts berücksichtigt. Er ist neben der Produktebene auch auf der Unternehmensebene anwendbar und kann durch seinen modularen Aufbau an verschiedene Sektoren und Bereiche angepasst werden (EMF & Granta, 2019). Der MCI-Wert liegt zwischen 0 und 1, wobei 0 einem vollständig linearen Produktsystem entspricht (vollständig neuer Materialeinsatz und keine Rückgewinnung) und 1 ein perfektes Kreislaufsystem (vollständig recycelter Input und vollständige Rückgewinnung nach der Nutzung). Dies macht den Indikator zu einem wertvollen Instrument zur Bewertung von Designstrategien, die auf eine Steigerung der Materialeffizienz und Kreislaufwirtschaft abzielen. Der MCI basiert auf zwei Teilindikatoren: dem Linear Flow Index (LFI) und dem Utility Factor (X). Der LFI quantifiziert den Anteil der linearen Materialströme. Wie sich dieser genau zusammensetzt, wird exemplarisch im Rahmen der Fallstudie Spülmittelkonzentrat in Kapitel 3.4.2 erläutert. Die berücksichtigten Parameter sind in dem folgenden Fließdiagramm (**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**) beschrieben.

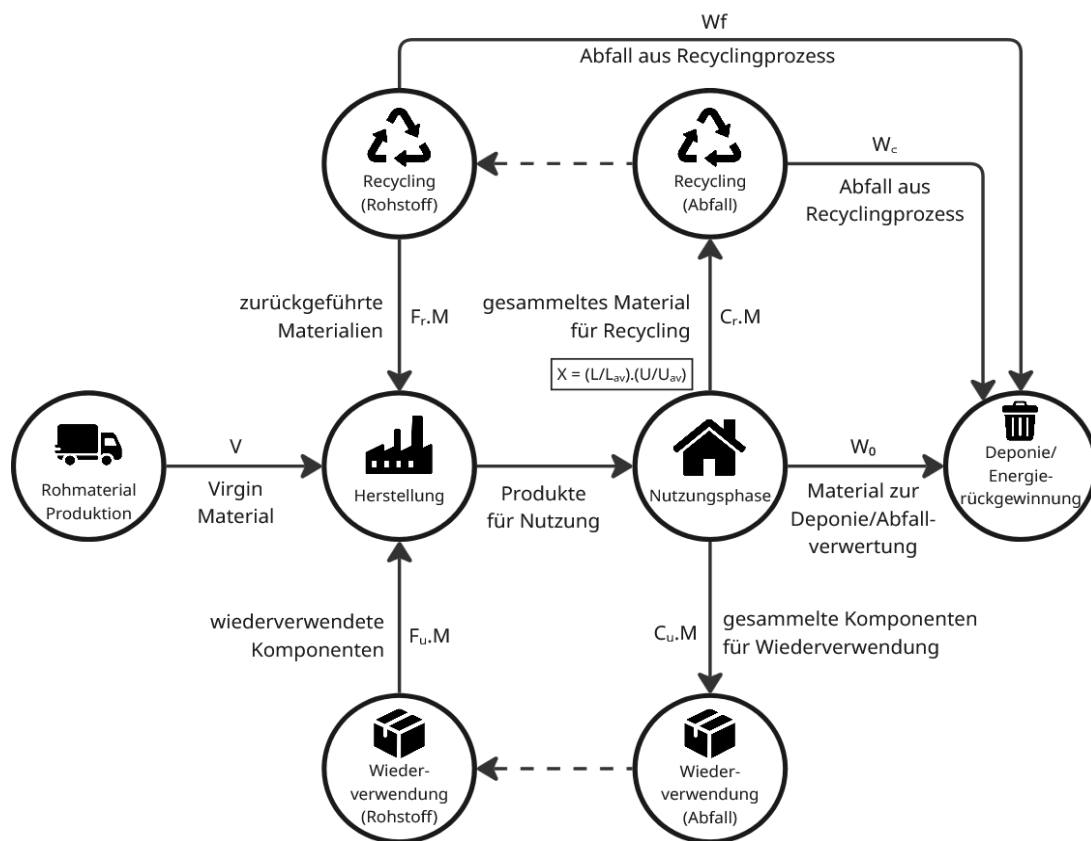


Abbildung 16: Berücksichtigte Materialflüsse für die Berechnung des MCI (EMF & Granta, 2019)

Bei Betrachtung der integrierten Materialflüsse des MCIs wird deutlich, dass v. a. die R-Strategien Recycling und Reuse im Vordergrund stehen. Allerdings ist zu beachten, dass in dem Fall, dass nicht alle Komponenten sondern nur Anteilige wiederverwendet werden, nach dem 9R-Rahmenwerk eher von Remanufacturing oder Repurpose die Rede ist (Potting et al., 2017). Für die Sensitivitätsanalyse können die komplexeren und zeitaufwändigeren Indikatoren PCI sowie LI in Betracht gezogen werden (Luthin et al., 2023). Die Bedeutungen der Formelzeichen sind in der folgenden Tabelle 5 und Tabelle 77 erläutert. Der PCI ist ein quantitativer Indikator, der auf der Basis des MCIs entwickelt wurde. Der PCI eignet sich zur Modellierung komplexerer Produktsysteme, da hier zusätzliche Parameter und Berechnungen einbezogen werden. Dies liefert eine detailliertere Darstellung, erfordert allerdings auch umfangreichere Datensätze. Die parametrischen und mathematischen Hauptunterschiede, sowie Vor- und Nachteile des PCI im Vergleich zum MCI sind in Tabelle 5 und Tabelle 6 zusammengefasst. Noch tiefgreifendere Details zur Berechnung der beiden Indikatoren können den jeweiligen Publikationen entnommen werden (Bracquené et al., 2020; EMF & Granta, 2019).



Tabelle 5: Unterschiede zwischen der Berechnung des MCIs und des PCIs (Bracquené et al., 2020; EMF & Granta, 2019)

Parameter	PCI	MCI
Primärrohstoff	$V = M \cdot (1 - F_r)$	$V = M \cdot (1 - F_r)$
Nicht gesammelte Masse des Produkts	$W_u = M \cdot (1 - C_r)$	$W_u = M \cdot (1 - C_r)$
Nicht verwertbare Abfälle aus der Sortierung	$W_s = M \cdot C_r \cdot (1 - E_s)$	-
Nicht verwertbare Abfälle aus dem Recycling	$W_c = M \cdot C_r \cdot E_s \cdot (1 - E_c)$	$W_c = M \cdot C_r \cdot (1 - E_c)$
Nicht verwertbare Abfälle aus der Produktion von rezyklierten Rohstoffen	-	$W_f = \frac{M \cdot F_r \cdot (1 - E_c)}{E_c}$
Gesamte nicht verwertbare Abfälle	$W = W_u + W_s + W_c$	$W = W_u + \frac{W_c + W_f}{2}$
Zufluss von recyceltem Material	$R_{in} = M \cdot F_r$	-
Abfluss von recyceltem Material	$R_{EOL} = R_{out} = M \cdot C_r \cdot E_s \cdot E_c$	-
Nettoaustausch von recyceltem Material	$R = R_{in} - R_{out} $ $= M \cdot F_r - C_r \cdot E_s \cdot E_c $	-
Linear flow index	$LFI = \frac{V + W + \frac{1}{2} \cdot R}{2 \cdot M}$	$LFI = \frac{V + W}{2 \cdot M + \frac{W_f - W_c}{2}}$
Utility factor	$X = \frac{L}{L_{av}} \cdot \frac{U}{U_{av}}$	$X = \frac{L}{L_{av}} \cdot \frac{U}{U_{av}}$
Indikator für Zirkularität	$PCI = 1 - \frac{LFI}{X}$	$MCI = 1 - 0,9 \cdot \frac{LFI}{X}$

Der PCI adressiert mehrere Schwachpunkte des MCIs - zum einen die Unklarheit, wie offene und geschlossene Recyclingkreisläufe bewertet werden. Zum anderen die generische und z. T. zu stark vereinfachte Betrachtung einiger Parameter, wie z. B. die Materialverluste während der Herstellung und des EoL (Bracquené et al., 2020). Die Erweiterung durch eine spezifische Berücksichtigung der Sortierung ist v. a. für die Fallstudie Spülmittelkonzentrat sehr relevant. Dessen Verpackungen werden planmäßig im Leichtverpackungsabfall entsorgt, welcher in Deutschland einer intensiven Sortierung mit i. d. R. signifikanten Wertstoffverlusten unterzogen wird.



Tabelle 6: Allgemeine Vor- und Nachteile der Zirkularitätsindikatoren MCI und PCI

Indikator	Vorteile	Nachteile
MCI	• Weithin anerkannt und einfach anzuwenden • Liefert einen normierten Wert für Benchmarking • Integriert Materialeinsatz und Nutzen (Lebensdauer, Intensität) • Ausgewogene Komplexität für viele Anwendungen	• Nachnutzungsverluste werden zu einem einzigen Effizienzbegriff zusammengefasst • Keine Modellierung von Produktionsverlusten • Parameter sind generisch und manchmal mehrdeutig • Keine Berücksichtigung der Qualität des recycelten Materials oder des Flussaustauschs
PCI	• Detailliert und produktorientiert • Explizite Modellierung aller Lebenszyklusstadien • Beinhaltet den Nettoaustausch von rezyklierten Inhalten mit der Umwelt • Parameter klar definiert und nachvollziehbar	• Hohe Komplexität und viele Eingabeparameter • Erfordert detaillierte und aufgeschlüsselte Daten • Wie MCI, berücksichtigt nicht Downcycling oder Qualitätsverlust

Dennoch bietet auch der PCI Raum für zukünftige Optimierung, da er z. B. das im Kontext Kreislaufwirtschaft wichtige Thema des Qualitätsverlusts der Materialien bisher gänzlich unberücksichtigt lässt. Der LI unterscheidet sich stark von dem MCI und PCI. Er misst den Beitrag zur Materialerhaltung nur auf der Grundlage des Zeitraums, in dem eine Ressource in Gebrauch bleibt. Er setzt sich dazu aus drei generischen Komponenten zusammen: der ursprünglichen Lebensdauer, die durch eine Wiederaufbereitung gewonnene Lebensdauer und die durchs Recycling gewonnene Lebensdauer (Franklin-Johnson et al., 2016). Da die Lebensdauerverlängerung bei der Spülmittelfallstudie nur einen sekundären Aspekt im Produktsystemvergleich darstellt, wird der LI als nicht zentraler Zirkularitätsindikator vernachlässigt.

Im Rahmen der C-LCSA wird des Weiteren die Nutzung der Indikatoren für Ressourceninputs und -outputs, die in der ISO 59020 (2024a) als Mindestanforderung für eine Zirkularitätsbewertung angegeben sind, empfohlen (Luthin et al., 2023). Die ISO 59020 stellt ein ähnliches sektor-unspezifisches Rahmenwerk zur Kreislaufwirtschaftsbewertung dar. Im Gegensatz zu vielen komplexen Indikatoren werden die ISO-Kernindikatoren anhand einfacher Formeln berechnet und in fünf Kategorien eingeteilt. Diese Indikatoren umfassen neben den Materialströmen auch Wasser-, Energie- und Finanzströme (ISO, 2024a). Eine Übersicht einiger CE-Indikatoren, die im Kontext verschiedener R-Strategien für eine Bewertung grundsätzlich in Frage kommen, ist in Tabelle 16 im Anhang A zusammengefasst. Neben generischen Rahmenwerken gibt es auch einige Studien zu branchenspezifischen Indikatoren oder kombinierten Ansätzen. Einige werden im Rahmen der Fallstudien genauer vorgestellt, um Vor- und Nachteile zu verdeutlichen.



3.4.2 Durchführung einer Zirkularitätsbewertung anhand der Fallstudie „Spülmittelkonzentrat“

Ergänzend zur Ökobilanzierung der Fallstudie, werden nun geeignete CE-Indikatoren identifiziert und angewandt, um die Zirkularität der untersuchten Produktsysteme zu bewerten. Um geeignete Indikatoren zu identifizieren, können die bereits vorgestellten Ansätze aus bisheriger Literatur zu Rate gezogen werden (Ahmed et al., 2022b; Saidani et al., 2019). Das heißt, dass z. B. abhängig davon welche CE-Strategie bewertet werden soll, verschiedene Indikatoren in Frage kommen (siehe Moraga et al. (2019)). Eine Übersicht aller R-Strategien und einiger CE-Indikatoren, die in diesem Kontext für eine Bewertung grundsätzlich in Frage kommen, ist in Tabelle 16 im Anhang A zusammengefasst. Wichtig ist hier zu betonen, dass für eine Zirkularitätsbewertung grundsätzlich empfohlen wird, fallspezifisch zu untersuchen, welche Indikatorensets relevant sind (Ahmed et al., 2022b; Moraga et al., 2019; Pauliuk, 2018; Saidani et al., 2019). Die Tabelle ermöglicht also nur eine Starthilfe für die Indikatorenauswahl. Die Verwendung des eingangs erwähnten Excel-Tools von Saidani et al. (2019) kann ebenfalls dabei helfen relevante Indikatoren zu identifizieren. Werden für die Fallstudie Spülmittelkonzentrat die zutreffenden Auswahlmöglichkeiten eingestellt (Abbildung 36 im Anhang C) wird von dem Tool nur ein Indikator empfohlen, der MCI (Saidani et al., 2019). Ergänzend bietet es sich an herauszufinden, welche CE-Indikatoren von verwandten Studien, die ähnliche Produktsysteme untersuchen, verwendet werden. Für die Spülmittel-Fallstudie sind einige verwandte Arbeiten und die darin angewandten CE-Indikatoren untersucht worden (aufgelistet in Tabelle 18 im Anhang D). Dadurch können neben generischen Indikatoren ggf. auch relevante branchenspezifische Indikatoren identifiziert werden. Das Ergebnis ist, dass der MCI sowohl in generischen als auch in branchenspezifischen Fallstudien der bisher dominierende Indikator ist. Dies ist nicht nur der Tabelle 18 im Anhang D zu entnehmen, sondern auch weiteren Referenzen (Bracquené et al., 2020); (Rigamonti & Mancini, 2021). Ein Vorteil des MCIs ist seine Flexibilität, da mehrere Studien dessen Formeln modifiziert oder ergänzt haben (Gonçalves et al., 2024; Tashkeel et al., 2021; Vadoudi et al., 2022). Daher wird in dieser Untersuchung exemplarisch der MCI als primärer Indikator angewandt. Zu Vergleichszwecken könnte es im Rahmen einer ausführlicheren Analyse zudem sinnvoll sein, den PCI für beide Produktsysteme zu berechnen, v. a. da die Verwendung von Indikatorensets im Allgemeinen empfohlen wird (Moraga et al., 2019).

3.4.3 Ergebnisse der Zirkularitätsbewertung der Fallstudie Spülmittelkonzentrat

Laut des Spülmittelherstellers wird durch das Hinzufügen des Leitungswassers exakt die gleiche Zusammensetzung (bzw. Formel) erreicht, wie bei dem herkömmlichen Produkt. Da das finale Produkt in Funktionsweise und Zusammensetzung bei beiden Produktsystemen identisch ist, kann dieses zumindest bei der Zirkularitätsbewertung vernachlässigt werden, da sich hieraus keine Unterschiede ergeben können. Der Zeitpunkt des Zuführens des Wassers hat allerdings einen Einfluss auf die Ökobilanzierung, da z. B. eine geringere Masse transportiert werden muss zwischen dem Hersteller und dem Verkauf (z. B. Supermarkt). Nähere Informationen zu den untersuchten Produktsystemen sind in Kapitel **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** zu finden. Um den MCI der beiden Produkte berechnen zu können, werden die folgenden Inputparameter benötigt (siehe Tabelle 7). Die Effizienzen der Recyclingprozesse sind einer Studie des Ökoinstituts (Bulach et al., 2022) entnommen. Die Produktmassen wurden mittels einer Laborwaage ermittelt. Für die restlichen Parameter werden Annahmen getroffen. Für den Anteil C_r wird die Sortiereffizienz für die verschiedenen Materialien angesetzt. Um den Nutzen bzw. die Utility zu berechnen, wird die Lebensdauer der Verpackung verwendet, während sich die Intensität der Nutzung auf den Produktinhalt bezieht. Jede betrachtete Einheit des konventionellen Spülmittels



(bzw. der Flasche) und des Spülmittelkonzentrats liefert eine funktionelle Einheit - „manuelles Geschirrspülen im Haushalt von 180 Gedecken (Golsteijn et al., 2015; Stamminger et al., 2007).

Tabelle 7: Inputparameter für die MCI-Berechnung der beiden untersuchten Produkte (bzw. deren Verpackungen) für die Funktionelle Einheit von 180 gewaschenen Gedecken

Parameter Definition (EMF, 2015)		Ein- heit	Konventionelles Spülmittel			Spülmittel- konzentrat
			PET Flasche	HDPE Deckel	PP Label	LDPE Pouch
M	Produktmasse	g	25,2	3,2	0,8	4,8
F _r	Anteil der Produktmasse aus rezykliertem Material	%	75	-	-	-
F _u	Anteil der Produktmasse aus wiederverwendetem Material	%	-	-	-	-
F _s	Anteil der Produktmasse aus biologischen Rohstoffen aus nachhaltiger Produktion (nicht aus Recycling / Wiederverwendung)	%	-	-	-	-
C _r	Anteil der Produktmasse, der für das Recycling gesammelt wird	%	70	70	70	70
C _u	Anteil der Produktmasse, der für Wiederverwendung gesammelt wird	%	-	-	-	-
C _c	Anteil der Produktmasse, der für Kompostierung gesammelt wird	%	-	-	-	-
C _e	Anteil der Produktmasse aus biologischen Rohstoffen aus nachhaltiger Produktion, gesammelt für Energierückgewinnung	%	-	-	-	-
E _c	Effizienz des Recyclingprozesses	%	63	67	74	70
E _f	Effizienz des Recyclingprozesses zur Produktion der Rohstoffe für das Produkt	%	63	-	-	-
L	tatsächliche durchschnittliche Lebensdauer des Produkts	Monat	1	1	1	1
L _{av}	Industriedurchschnittliche Lebensdauer des Produkts	Monat	1	1	1	1
U	tatsächliche durchschnittliche Anzahl erreichter Funktioneller Einheiten während der Nutzungsphase des Produkts	-	1	1	1	1
U _{av}	Industriedurchschnittliche Anzahl erreichter Funktioneller Einheiten während der Nutzungsphase des Produkts	-	1	1	1	1



Es wird davon ausgegangen, dass Deckel und Etikett bei der Sortierung an der Flasche befestigt bleiben und bei der stofflichen Verwertung der PET-Fraktion abgetrennt und den jeweiligen Verwertungsprozessen zugeführt werden. Die Lebensdauer der Flasche verlängert sich mit der Anzahl der Nachfüllungen, da sie an die Anzahl der Wiederverwendungen der Flasche gekoppelt ist. Die Lebensdauer des Standbodenbeutels entspricht der Dauer, in der das Spülmittelkonzentrat aufgebraucht wird, und ist daher abhängig von der funktionellen Einheit festgelegt. Diese Inputparameter werden in die entsprechenden Formeln eingesetzt (Details hierzu siehe EMF und Granta (2019)), sodass sich die Variablen und Endergebnisse aus Tabelle 8 ergeben.

Tabelle 8: Variablen und Endergebnisse für die MCI-Berechnung der beiden untersuchten Produkte (bzw. deren Verpackungen)

Parameter Definition (EMF, 2015)		Einheit	Konventionelles Spülmittel			Spülmittelkonzentrat
			PET Flasche	HDPE Deckel	PP Label	LDPE Pouch
V	Masse der zugeführten Materialien, die nicht aus Recycling, Wiederverwendung oder nachhaltiger Produktion stammen	g	6,30	3,20	0,80	4,8
W ₀	nicht verwertbarer Abfall aus Produktmaterial (zur Deponierung etc.)	g	7,56	0,96	0,24	1,44
W _c	Masse der nicht verwertbaren Abfälle im Recyclingprozess	g	6,53	0,74	0,15	1,01
W _f	Masse an nicht verwertbarem Abfall zur Herstellung von rezykliertem Ausgangsmaterial für das Produkt	g	11,10	0,00	0,00	0,00
W	Gesamtmasse nicht verwertbarer Abfall	g	16,37	1,33	0,31	1,94
X	Utility (dt. Nutzen)	–	1,00	1,00	1,00	1,00
F(X)	Utility factor	–	0,90	0,90	0,90	0,90
LFI	Linear flow index (Komponenten)	–	0,43	0,75	0,73	0,74
MCI _i	Material Circularity Index (Komponenten)	–	0,61	0,32	0,34	0,33
MCI_{tot}	Material Circularity Index (gesamt)	–	0,57			0,33

Im direkten Vergleich zwischen den beiden Verpackungen wird deutlich, dass das konventionelle Spülmittel besser abschneidet mit einem MCI von 0,57 im Vergleich zu 0,34 für den Standbodenbeutel. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Flasche zu 75 % aus rezykliertem Material produziert wird, während der Pouch komplett aus Virgin Material hergestellt wird. Für die Betrachtung der Kombination beider Produkte (bei gleichbleibender funktioneller Einheit), wird von beiden Produkten eine halbe Einheit angesetzt, die jeweils eine halbe funktionelle Einheit beisteuert. Zur Übersichtlichkeit werden in Tabelle 9 nur noch die Inputparameter, Variablen und Ergebnisse aufgelistet, die ungleich null sind im Kontext dieser Fallstudie.



Tabelle 9: Inputparameter, Variablen, Endergebnisse der MCI-Berechnung für die Produktkombination für die FU von 180 gewaschenen PS (ein Nachfüllvorgang)

Parameter Definition (EMF, 2015)		Einheit	Konventionelles Spülmittel			Spülmittelkonzentrat
			PET Flasche	HDPE Deckel	PP Label	LDPE Pouch
M	Produktmasse	g	12,6	1,6	0,4	2,4
F _r	Anteil der Produktmasse aus rezykliertem Material	%	75	-	-	-
C _r	Anteil der Produktmasse, der für das Recycling gesammelt wird	%	70	70	70	70
E _c	Effizienz des Recyclingprozesses	%	63	67	74	70
E _f	Effizienz des Recyclingprozesses zur Rohstoffproduktion für das Produkt	%	63	-	-	-
L	tatsächliche durchschnittliche Lebensdauer des Produkts	Monat	1	1	1	1/2
L _{av}	Industriedurchschnittliche Lebensdauer des Produkts	Monat	1/2	1/2	1/2	1/2
U	tatsächliche durchschnittliche Anzahl erreichter Funktioneller Einheiten während der Produktnutzungsphase	-	1/2	1/2	1/2	1/2
U _{av}	Industriedurchschnittliche Anzahl erreichter Funktioneller Einheiten während der Produktnutzungsphase	-	1/2	1/2	1/2	1/2
V	Masse der zugeführten Materialien, die nicht aus Recycling, Wiederverwendung oder nachhaltiger Produktion stammen	g	3,15	1,60	0,40	2,4
W ₀	nicht verwertbarer Abfall aus Produktmaterial (zur Deponierung etc.)	g	3,78	0,48	0,12	0,72
W _c	nicht verwertbarer Abfall aus Recyclingprozess	g	3,26	0,37	0,07	0,50
W _f	Masse an nicht verwertbarem Abfall zur Herstellung von rezykliertem Ausgangsmaterial für das Produkt	g	5,55	0,00	0,00	0,00
W	Gesamtmasse nicht verwertbarer Abfall	g	8,19	0,66	0,16	0,97
X	Utility (dt. Nutzen)	-	2,00	2,00	2,00	1,00
F(X)	Utility factor	-	0,45	0,45	0,45	0,90
LFI	Linear flow index (Komponenten)	-	0,43	0,75	0,73	0,74
MCI _i	Material Circularity Index (Komponenten)	-	0,81	0,66	0,67	0,33
MCI _{tot}	Material Circularity Index (gesamt)	-	0,72			



Die Kombination beider Produkte erreicht eine deutlich höhere Zirkularität als die der Einzelprodukte bzw. eine Steigerung der MCIs. Dies ist darauf zurückzuführen, dass sich die Lebensdauer der Spülmittelflasche im Vergleich zur Einzelbetrachtung verdoppelt. Dies hat einen großen Einfluss auf den Utility Factor (dt. Nutzenfaktor) der Flasche.

Um die Ergebnisse der LCA und der Zirkularitätsbewertung gut zusammenführen und analysieren zu können, werden die gleichen Szenarien bzgl. des Verbraucherverhaltens untersucht, indem die Anzahl der Wiederverwendungen und des Wiederauffüllens der Flasche auf 5 erhöht wird. Zudem wird untersucht, wie sich der Rezyklatanteil der PET-Flasche auf die Zirkularität des konventionellen Spülmittel-Produktsystems auswirkt. Im Referenzszenario wird ein Rezyklatanteil von 75 % angenommen. Als Alternativen werden 50 % und 100 % angenommen. Da der Transport nicht zur materiellen Zirkularität des Systems beiträgt, wird dessen Analyse in diesem Abschnitt nicht berücksichtigt. Die Tabellen zu den entsprechenden Inputparametern und Variablen sind im Anhang C



3.5 Anhang D

Tabelle 18: Übersicht einiger CE und Zirkularitätsbewertungen im Kunststoff und Verpackungssektor

Autor & Jahr	Übersicht	CE-Indikatoren
Nicro und Kalbar (2019)	Rahmenwerk für die Auswahl von CE-Indikatoren mit Lebenszyklusperspektive; Fallstudie zur Bierindustrie	MRS, MCI
Sazdovski et al. (2024)	Vergleichende Studie über Sekundärverpackungen von frischen Lebensmitteln in Spanien; Einwegkarton gegenüber Mehrwegkisten	MCI, PCI
Roos Lindgreen et al. (2021)	CE-Indikatoren Übersicht für Glas- und PET-Flaschen aus der grauen Literatur	MCI, MRS, RESCOM, UL3600, CTI
Lonca et al. (2020)	Strategien für closed-loop Recycling im PET-Sektor in den USA	MCI
Chairat und Gheewala (2023)	C-LCA des open und closed-loop Recyclings; PET Bottle-to-Bottle vs. Bottle-to-Fiber	MCI
Vadoudi et al. (2022)	C-LCA von mehrschichtigen Kunststoffverpackungen	Eine modifizierte Version von MCI
Matos et al. (2024)	Überprüfung von Indikatoren und Taxonomie zur Verwendung in CE und Ökodesign	MCI, CEIP, VRE
Karayılan et al. (2021)	Anwendung von CE-Ansätzen zur Minimierung der Umweltauswirkungen im Bereich der Kunststoffverpackungen	MCI
Tashkeel et al. (2021)	Ökonomisch basierte CE-Bewertung von Leichtverpackungsabfällen (LVP)	Eine kostennormierte Version des MCI
Pauer et al. (2019)	Empfehlung von eindimensional kategorisierten CE-Indikatoren für Lebensmittelverpackungen: Input/Output/Energie	Rezyklateinsatz, Wiederverwendungsrate, etc.
Gonçalves et al. (2024)	CE-Analyse und MFA im portugiesischen LVP-Sektor	Eine modifizierte Version von MCI
Thomassen et al. (2024)	Vergleichende C-LCA von Mehrweg- und Einweg-Reisverpackungen	Pauer et al. (2019) Indikatoren, MCI
Matos et al. (2023)	Klassifizierung von 30 CE-Indikatoren auf Mikroebene im Hinblick auf CE-Strategien und Identifizierung von relevanten Indikatoren für den Kunststoffverpackungssektor	MCI, PCI, VRE, CPI, SCI, TRP, CEI, GRI, PLCM
Syu et al. (2022)	CE-Bewertung von Lebensmittelqualität-Kunststoffen	MRS, CEV, PLCM, MRI, MCI
Rasines et al. (2024)	C-LCA von Frischobstverpackungen; wiederverwendbare gegenüber Einwegkisten	MCI, MRS, CI
Šuskevičė und Kruopienė (2020)	Modelle zur Wiederverwendung von Festival-Getränkebechern und CE-Auswirkungen	MCI



Anhang hinterlegt, sodass bei der folgenden Analyse v.a. ein Fokus auf der Varianz der Endergebnisse liegt (siehe **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**).

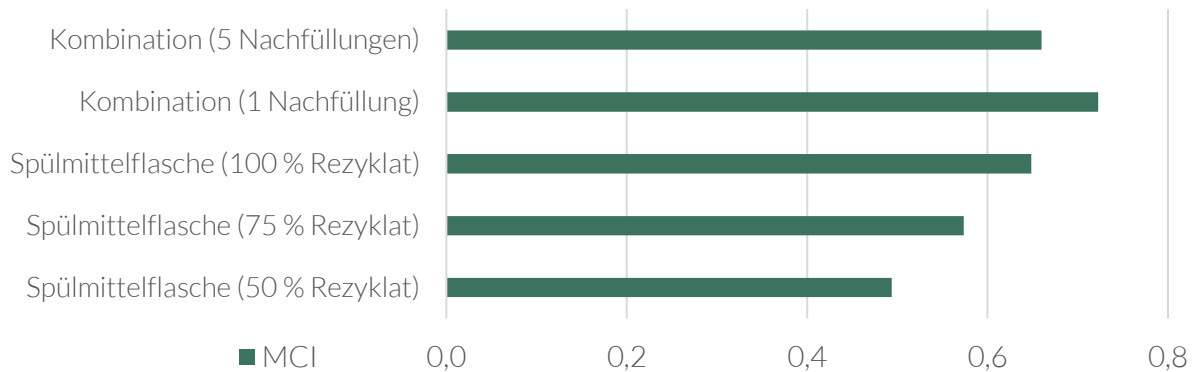


Abbildung 17: MCI-Ergebnisse aller untersuchten Szenarien zusammengefasst

Interessant zu beobachten ist, dass eine Erhöhung der Nachfüllzyklen auf fünf zu einer Reduzierung der Zirkularität führt. Auf der einen Seite erhöht sich der Nutzen der Spülmittelflasche, dadurch, dass sie 5-mal wiederverwendet wird. Auf der anderen Seite werden allerdings fünf Standbodenbeutel statt zuvor einer benötigt, welcher anders als die Flasche vollständig aus Virgin Material produziert wird. Durch den gestiegenen Masseanteil des Beutels als Produktsystemkomponente (im Vergleich zur Flasche mit Rezyklateinsatz) steigt auch die Auswirkung seines niedrigeren MCIs auf das Gesamtergebnis des Produktsystems. Hier könnte es des Weiteren sinnvoll sein, die Anzahl an Wiederverwendungszyklen zu ermitteln, die zu einem maximalen MCI-Wert bzw. Zirkularität führt. Der reduzierte und erhöhte Anteil an Rezyklateinsatz hat den erwarteten Effekt auf das MCI-Ergebnis der Spülmittelflasche, und zwar eine Reduzierung bzw. Steigerung der Zirkularität.

Zusammenfassend zeigt die Zirkularitätsbewertung, dass das Spülmittelkonzentrat (bzw. dessen Verpackung) eine geringere Zirkularität (MCI) aufweist als die konventionelle Spülmittelflasche. Die vom Hersteller vorgesehene kombinierte Nutzung der beiden Produkte hingegen steigert die Zirkularität des Produktsystems, wodurch es das Potenzial hat, zu einer Kreislaufwirtschaft beizutragen.

3.6 Zusammenführung der Ergebnisse der Kreislaufwirtschaftsbewertung der Fallstudie Spülmittelkonzentrat

Abschließend gilt es die Erkenntnisse aus der Zirkularitätsbewertung und Ökobilanzierung zusammenzuführen, um finale Schlüsse zu ziehen. Je komplexer und zahlreicher die eingesetzten Indikatoren, desto schwieriger ist es, diese für eine Entscheidungsfindung zu interpretieren. Wie zuvor erwähnt wird im Rahmen einer Kreislaufwirtschaftsbewertung hierfür häufig *Multi Criteria Decision Making* (MCDM) eingesetzt (Ferrante et al., 2025). Das Ziel von MCDM ist die logische Bestimmung der Gewichtung zwischen mehreren Metriken (Kim et al., 2022). Dies ist im Kontext von Kreislaufwirtschaft relevant, da die darin enthaltenen Ziele z. T. im Konflikt zueinanderstehen können (Karayılan et al., 2021). Eine Gewichtung dieser Kriterien, kann somit hilfreich sein für eine Entscheidungsfindung basierend auf verschiedenen CE-Aspekten für verschiedene Bewertungsebenen (Sassanelli et al., 2019).



Da die Fallstudie Spülmittelkonzentrat einen exemplarischen Charakter hat und bewusst nur einzelne besonders relevante Aspekte einer Kreislaufwirtschaftsbewertung beleuchtet, wird auf eine Gewichtung verzichtet. Zur Übersichtlichkeit werden für die Zusammenführung zwei relevante Zielkategorien aus den LCA-Ergebnissen extrahiert: Climate Change (CC), also das Global Warming Potential [CO₂-Eq] und Material Resources (MR) [kg Cu-Eq] (skaliert). Dies ist v. a. zu empfehlen, da bei der Analyse der LCA-Ergebnisse keine Zielkonflikte zwischen verschiedenen Umweltauswirkungskategorien festgestellt werden konnten, was das weitere Einbeziehen aller Kategorien unnötig aufwändig und unübersichtlich macht. Folglich werden die zwei Kategorien CC und MR für die untersuchten Szenarien dem MCI aus der Zirkularitätsbewertung gegenübergestellt (**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**). Wie zuvor in Kapitel 3.3.4 beschrieben, sind die Unterschiede zwischen den Szenarien der LCA eher marginal bei der Gesamtproduktbetrachtung, da hier die Umweltauswirkungen der Nutzungsphase mit ca. 85 % Beitrag überwiegen. Aus diesem Grund beziehen sich die folgenden Ergebnisse nur noch auf die beiden Produktverpackungen. Eine reine Betrachtung des aggregierten Indikators MCI (ohne den darin enthaltenen Variablen) bietet sich bei der Zusammenführung an, um Übersichtlichkeit und Klarheit zu gewährleisten. Dennoch ist zu betonen, dass anhand des aggregierten Indikators keine eindeutigen Aussagen dazu getroffen werden können, auf welche spezifischen Maßnahmen die Unterschiede der MCI-Endergebnisse zurückzuführen sind. Hierfür ist es ratsam die Variablen bzw. Einzelindikatoren zu analysieren, wie in Kapitel 3.4.3.

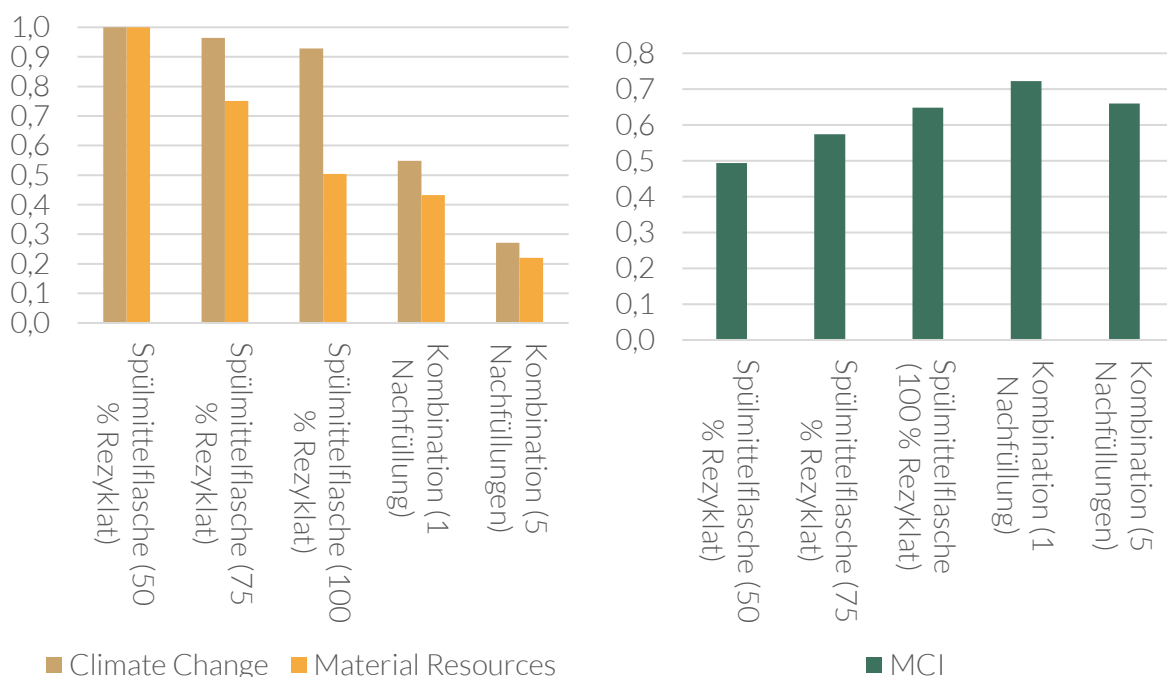


Abbildung 18: MCI und skalierte CO₂- und Kupfer-Äquivalente der untersuchten Produktverpackungen

Bzgl. der Spülmittelflasche wird deutlich, dass eine Erhöhung des Rezyklatanteils sowohl ökologisch als auch in Bezug auf Zirkularität vorteilhaft ist. Die CO₂- und Kupfer-Äquivalente sinken und die Zirkularität bzw. der MCI steigt. Die Kombination (ein Nachfüllvorgang) beider Produkte erreicht die höchste Zirkularität, und geringere ökologische Auswirkungen (CC und MR) als das konventionelle Spülmittel. Die Erhöhung der Nachfüllzyklen wirkt sich positiv auf die



Umweltauswirkungen (CC und MR) aus, allerdings leicht negativ auf die Zirkularität nach MCI. Dies könnte bspw. behoben werden, indem für die Produktion des Standbodenbeutels Sekundärmaterial eingesetzt werden würde.

Die Ergebnisse der exemplarischen Kreislaufwirtschaftsbewertung deuten zusammenfassend darauf hin, dass das neue Produkt-Nachfüllsystem „Spülmittelkonzentrat“ das Potenzial hat, zur Transformation zu einer CE beizutragen, da es die Umweltauswirkungen (CC und MR) reduziert. Damit auch für mehrere Nachfüllvorgänge die Zirkularität (nach MCI) im Vergleich zu dem konventionellen Spülmittel-Produktsystem gesteigert werden kann, wäre es allerdings ratsam, die Verpackung des Konzentrats ebenfalls aus Sekundärmaterial zu produzieren oder ggf. sogar eine wiederverwendbare Mehrwegverpackung in Betracht zu ziehen. Wie zuvor bereits erwähnt sollten für eine umfassende Kreislaufwirtschaftsbewertung zusätzlich soziale und ökonomische Aspekte mitberücksichtigt werden (ISO, 2024a; Luthin et al., 2023). Des Weiteren sollte die Zirkularitätsbewertung für eine tiefgreifendere Analyse erweitert durch die Anwendung weiterer Indikatoren werden, wie bspw. dem PCI zur Erreichung eines Indikatorensatzes (Moraga et al., 2019). Gleiches gilt auch für die Szenario- und Sensitivitätsanalyse im Rahmen der Ökobilanzierung. Die Nutzungsphase hat einen sehr großen Anteil (ca. 85 %) an den ökologischen Auswirkungen der Gesamtproduktsysteme, wie die Analyse in Kapitel 3.3.4 zeigt. Folglich ist zu erwarten, dass das Nutzer*innenverhalten enorme Auswirkungen auf die Gesamtergebnisse der Ökobilanzierung hat. Diese könnten zukünftig neben weiteren Parametern tiefgreifender untersucht werden.



4 Kreislaufwirtschaftsbewertung auf Mikroebene

Der Fokus dieses Kapitels liegt auf der Analyse der Mikro-Ebene. Die verwendete Klassifikation für die systemischen Ebenen umfasst: Nanoebene (Produkte), Mikroebene (Unternehmen), Mesoebene (industrielle Symbiose) und Makroebene (Regierungen) (Oliveira et al., 2021). Dieser Abschnitt ist in spezifische und komplementäre Teile untergliedert, mit dem Ziel, ein umfassendes und theoretisch fundiertes Rahmenwerk zur Bewertung der Kreislaufwirtschaftsleistung auf der Mikro-Ebene vorzustellen. Zunächst werden allgemeine Leitlinien dafür beschrieben, wie ein System zur Messung der Leistungsfähigkeit der Kreislaufwirtschaft aufgebaut sein sollte (Abschnitt 4.1-4.2). Die zentralen Fragen, die beantwortet werden, sind u.a.: Wie bestimmen die Prinzipien der Kreislaufwirtschaft, welche Leistungsindikatoren herangezogen werden sollten? Und wie lässt sich die Umsetzung der Kreislaufwirtschaft in Unternehmen mithilfe von Leistungsindikatoren operationalisieren? Anschließend werden zentrale Konzepte aus dem Bereich der Leistungsbewertung eingeführt und ihre Relevanz für die Mikro-Ebene der CE hervorgehoben. Drittens werden die Ergebnisse einer umfassenden Literaturrecherche vorgestellt, die sowohl akademische als auch nicht-akademische Quellen berücksichtigt und sich auf die wichtigsten bestehenden Rahmenwerke konzentriert (Abschnitt 4.3). Es folgt eine Diskussion des aktuellen Stands der CE-Messung in Unternehmen, einschließlich bestehender Hindernisse und Verbesserungspotenziale (Abschnitt 4.4). Daraufhin wird das vorgeschlagene Rahmenwerk vorgestellt, das eine umfassende Liste von Indikatoren beinhaltet, die nach einer kohärenten und belastbaren Logik strukturiert sind (Abschnitt 4.5). Abschließend wird das Rahmenwerk auf eine einfache Fallstudie angewendet, um seine praktische Anwendbarkeit zu demonstrieren (Abschnitt 4.6).

4.1 Ansätze zur Messung der Zirkularität auf Mikroebene

Dieser Abschnitt des Kapitels folgte vier grundlegenden methodischen Schritten: Literaturrecherche, Auswahl der Quellen, Analyse der Rahmenwerke und Zusammenfassung der Ergebnisse, wobei Lücken und Erkenntnisse zur Messung der Leistungsfähigkeit der Kreislaufwirtschaft dargestellt wurden. Im Folgenden werden nun jede dieser Schritte näher erläutert.

Der erste Schritt besteht darin, eine bibliografische Übersicht durchzuführen, um die relevantesten Rahmenwerke zur Messung der Leistung der CE zu identifizieren. Dabei war es nicht das Ziel, eine vollständige Suche aller verfügbaren Rahmenwerke durchzuführen, sondern vielmehr zentrale Referenzen hervorzuheben, insbesondere solche mit einer hohen Anzahl von Zitierungen und großer Wirkung. Die Recherche erfolgte auf Englisch und Deutsch unter Verwendung wissenschaftlicher Datenbanken, darunter Web of Science und Google Scholar.

Neben begutachteten wissenschaftlichen Publikationen umfasste die Literaturübersicht auch frei zugängliche Referenzmodelle und Rahmenwerke zu Indikatoren der CE. Um Relevanz und Repräsentativität sicherzustellen, mussten die ausgewählten Quellen eine Anerkennung bei verschiedenen Interessengruppen aufweisen, darunter staatliche Institutionen sowie Organisationen des Privatsektors. Aus diesem Grund wurden Rahmenwerke bevorzugt, die von einflussreichen Institutionen entwickelt wurden, die aktiv mit mehreren Stakeholdern zusammenarbeiten, wie die Internationale Organisation für Normung (ISO) und die Ellen MacArthur Foundation (EMF). Die Auswahl nicht-akademischer Quellen basierte auf dem Fachwissen der Autoren sowie auf offenen Internetsuchen, die darauf abzielten, weit verbreitete



und praktisch relevante Materialien zu erfassen (



Abbildung).



Abbildung 19: Vorgehensweise bei der Literaturübersicht, die in dieser Studie angewendet wurde

Im Zuge des Auswahlprozesses wurden 18 Referenzrahmen identifiziert, wie in Tabelle 10 dargestellt. In allen Fällen wurden Indikatoren und deren Anwendungsrahmen nur ausgewählt, wenn vollständige Transparenz gewährleistet war, was sich durch die Verfügbarkeit klarer Beschreibungen ihrer Struktur und der zugehörigen Messgrößen zeigte.

Die Analyse hat gezeigt, dass es derzeit keinen allgemein anerkannten Ansatz zur Messung der zirkulären Wirtschaft auf Mikroebene gibt, ebenso wenig wie eine standardisierte Methodik, die mit den verschiedenen Prinzipien der zirkulären Wirtschaft, wie Werterhalt, Ressourceneffizienz oder systemischem Denken, übereinstimmt. Dieses Ergebnis stimmt mit den Schlussfolgerungen von Sassanelli et al. (2019) sowie Kristensen und Mosgaard (2020) überein, die ebenfalls auf die Fragmentierung und den fehlenden Konsens in diesem Forschungsfeld hinweisen. Auch Rincón-Moreno et al. (2021) bestätigen die Auffassung, dass allgemein anerkannte Messgrößen auf Mikroebene fehlen. Nach Ansicht der Autoren besteht eine mangelnde Kohärenz zwischen den Konzepten der CE und den entsprechenden Indikatoren. So existiert bspw. keine standardisierte Methodik zur Bewertung und zum Vergleich von Unternehmen hinsichtlich ihres Fortschritts bei der Umsetzung von Maßnahmen der CE.

Nach der Auswahl wurden die Referenzmodelle analysiert, um ihre Indikatoren hinsichtlich ihrer systemischen Perspektive, der Integration entlang der Wertschöpfungskette, der Einbeziehung von Strategien der zirkulären Wirtschaft sowie der Berücksichtigung biologischer Kreisläufe und finanzieller Dimensionen zu klassifizieren. Darüber hinaus wurden der Einsatz mathematischer



Ausdrücke zur Quantifizierung von Auswirkungen sowie die Berücksichtigung branchenspezifischer Indikatoren als Teil der Bewertungskriterien berücksichtigt.

Tabelle 10: Liste der konsultierten Referenztypen und Beschreibung ihrer Hauptmerkmale

Legende: (1) Indikatoren, die spezifisch für verschiedene CE-Strategien sind; (2) Indikatoren, nach Wertschöpfungskettenstufen aufgeschlüsselt; (3) Einbeziehung sozio-institutioneller Indikatoren; (4) Einbeziehung von Indikatoren zu biologischen Kreisläufen; (5) Einschluss zusammengesetzter Indikatoren, Verhältniszahlen oder Indizes; (6) Einschluss finanzieller Daten; (7) universell sowie branchenspezifisch; * Sammlung unternehmensspezifischer Indikatoren zur Zirkularitätsleistung

Typ	Quelle	Wesentliche behandelte Merkmale
1	(Di Maio & Rem, 2015)	(1) (5) (6)
1	(Evans & Bocken, 2013)	(1) (2) (3) (4) (5) (6)
1	(Franco et al., 2021)	(1) (3) (4) (5) (6)
1	(Franklin-Johnson et al., 2016)	(1) (5)
1	(Rincón-Moreno et al., 2021)	(1) (2) (3) (5) (6)
1	(Rossi et al., 2020)	(1) (2) (3) (6)
1	(Sucozhañay et al., 2022)	(1) (2) (3) (6)
2	(GRI, 2024)	(1) (2) (3) (5) (6) (7)
2	(International Financial Reporting Standards, 2024)	(1) (2) (3) (4) (6) (7)
2	(European Financial Reporting Advisory Group)	(1) (2) (3) (4) (5) (6)
3	(ISO, 2024a)	(1) (3) (4) (5) (6)
4	(EMF & Granta, 2019) – MCI	(1) (4) (5)
4	(EMF & Granta, 2019) – Circulytics®	(1) (2) (3) (4) (6)
4	(WBCSD, 2021)*	(3) (5) (6)
5	(BASF, 2025)*	(2)
5	(Fairphone, 2024)*	(2) (3)
5	(Covestro, 2025)*	(2)
5	(Henkel AG & Co. KGaA)*	(2) (5)

Eine Analyse der in Tabelle 10 dargestellten Referenzen verdeutlicht das Fehlen einer einheitlich anerkannten Methodik zur Bewertung der Kreislaufwirtschaftsleistung auf Unternehmensebene. Obwohl die meisten Rahmenwerke spezifische Indikatoren enthalten, die mit verschiedenen Strategien der Kreislaufwirtschaft übereinstimmen, gelingt es ihnen häufig nicht, alle Stufen der Wertschöpfungskette umfassend abzudecken, bspw. vorgelagerte Lieferanten oder nachgelagerte Kunden. Darüber hinaus gehen viele Ansätze über operative Kennzahlen hinaus und beziehen auch managementbezogene Indikatoren ein, wie etwa Umsätze, die durch zirkuläre Geschäftsmodelle generiert werden. Nur eine begrenzte Anzahl von Modellen berücksichtigt explizit biologische Kreisläufe, während sich die Mehrheit ausschließlich auf technologische Kreisläufe konzentriert. Auch die Komplexität der Indikatoren variiert erheblich, da einige Rahmenwerke auf



Benutzerfreundlichkeit setzen und mathematische Formulierungen vermeiden, während andere anspruchsvollere quantitative Messgrößen verwenden. Die Integration branchenspezifischer Indikatoren bleibt zudem eine Seltenheit.

4.2 Bewertung der Unternehmensleistung in der Zirkularität: Theorie im Vergleich zur Praxis

Die Ausgereiftheit von Leistungsmesssystemen für die zirkuläre Wirtschaft in Unternehmen bleibt weiterhin begrenzt. In der Regel konzentrieren sich Indikatoren zur Kreislaufwirtschaft auf physikalische Parameter und die Materialzirkularität, wobei andere entscheidende Aspekte wie politische Rahmenbedingungen, Beiträge der Kundschaft sowie technologische Fortschritte häufig unberücksichtigt bleiben (Ahmed et al., 2022a). An et al. (2017) halten es ebenfalls für wichtig, Indikatoren der Zirkularität auch für sozio-institutionelle Aspekte einzubeziehen.

Die Mehrheit der Indikatoren zur Zirkularität fokussiert sich vorwiegend auf niedrigschwellige R-Strategien. Ein deutlicher Rückgang der Häufigkeit von Indikatoren in den oberen R-Strategien (R-R3) ist zu beobachten. Insbesondere Indikatoren, die Strategien wie Wiederverwendung, Reparatur oder Wartung adressieren, sind weniger verbreitet. Häufig erfasste Indikatoren umfassen Abfallentsorgung, den Einsatz von primären im Vergleich zu sekundären Ressourcen, Ressourceneffizienz und -produktivität sowie Recyclingeffizienz. Demgegenüber sind Messgrößen, die den Werterhalt sowie dynamische Elemente von Produkten und Systemen abbilden, nach wie vor unterrepräsentiert (Barastas et al., 2022).

In einer Typologiestudie zu Daten für die zirkuläre Wirtschaft führten Araujo et al. (2025) eine Häufigkeitsanalyse der meistverwendeten Datentypen zur Leistungsbewertung durch (

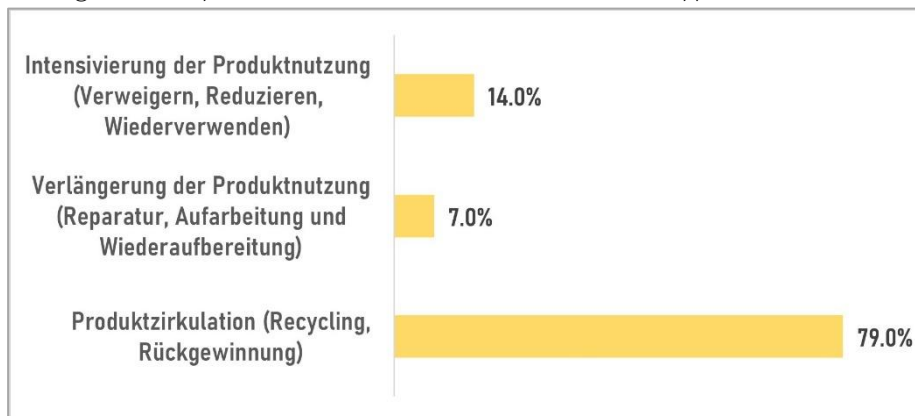


Abbildung 19). Strategien zur Produktzirkulation, insbesondere Recycling und Rückgewinnung, machen den größten Anteil der Daten zur zirkulären Wirtschaft auf Mikroebene aus. Mit deutlichem Abstand folgen Strategien, die auf eine intelligentere Nutzung von Ressourcen und Produkten abzielen, wie etwa Refuse, Rethink und Reduce. Schließlich treten Indikatoren, die sich auf die Intensivierung der Produktnutzung konzentrieren, wie Reuse, seltener auf. Dies spiegelt lediglich den aktuellen Stand wider und kann als Aufruf verstanden werden, dass Unternehmen und andere Akteure verstärkt Maßnahmen über Strategien der Materialzirkulation hinaus ergreifen sollten.

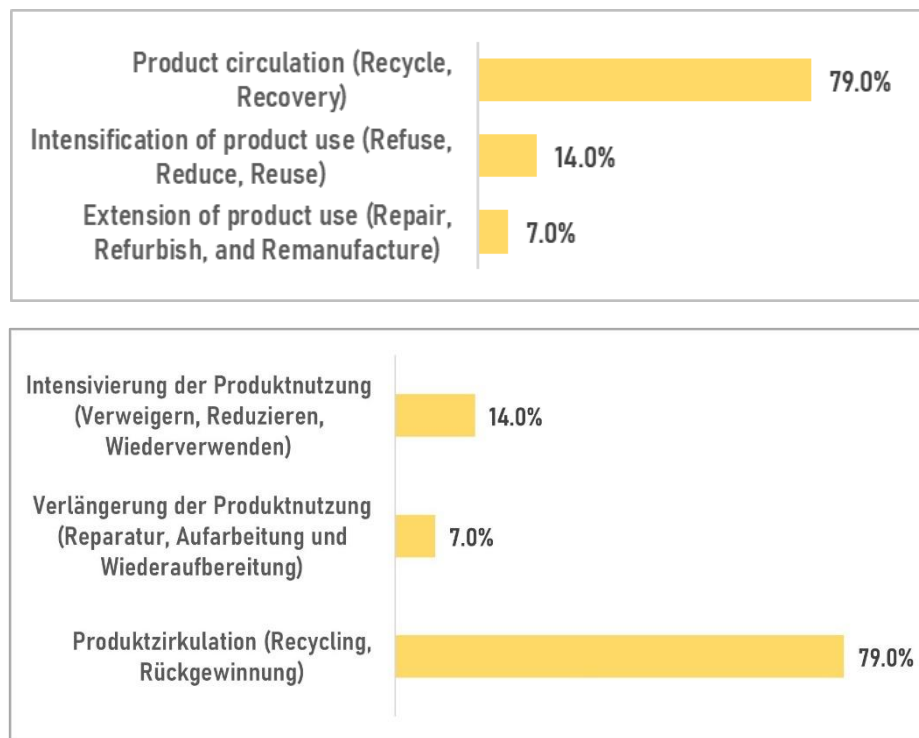


Abbildung 19: Häufigkeit der Nutzung von Daten zur zirkulären Wirtschaft gemäß den R-Strategien (Araujo et al., 2025)

Darüber hinaus stellt die inhärente Verbindung zwischen dem Produktlebenszyklus und der Kreislaufwirtschaft eine Herausforderung für Indikatoren auf Unternehmensebene dar, da zirkuläre Lösungen häufig mehrere Phasen umfassen (Kristensen & Mosgaard, 2020). Es besteht weiterhin die vorherrschende Wahrnehmung, dass Unternehmen ihre Bemühungen im Bereich der Kreislaufwirtschaft hauptsächlich auf die End-of-Life-Phase des Produkts konzentrieren, welche unter anderem Rückwärtslogistik und Dienstleister einschließt (

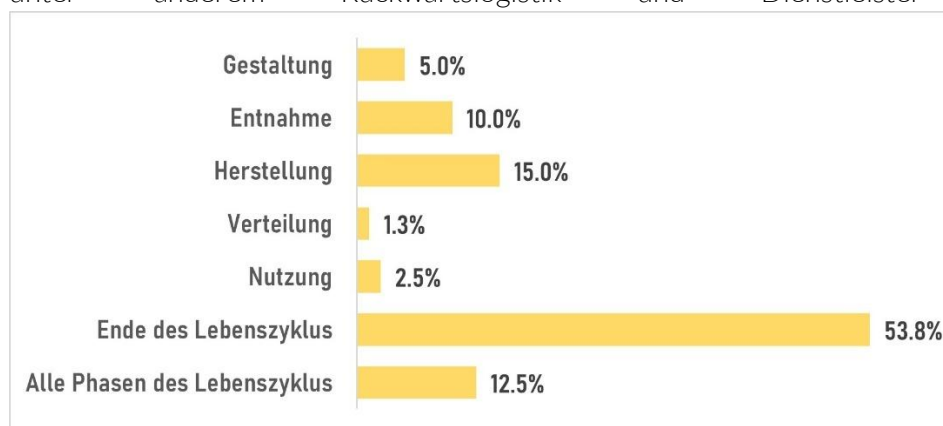


Abbildung 20).

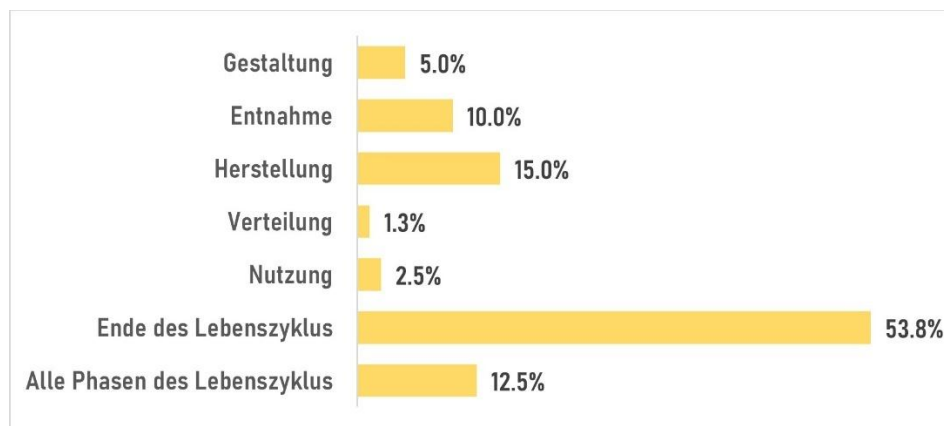


Abbildung 20: Häufigkeit der Nutzung von Kreislaufwirtschaftsdaten entsprechend den Lebenszyklusphasen (Araujo et al., 2025)

Es wäre zu erwarten, dass den Phasen der Rohstoffgewinnung und des Verbrauchs angesichts ihrer erheblichen ökologischen und sozialen Auswirkungen entlang der Wertschöpfungskette größere Aufmerksamkeit geschenkt wird. Obwohl diese Maßnahmen relevant sind, stellen sie nur einen Teil der gesamten Wertschöpfungskette dar. Positiv hervorzuheben ist die zunehmende Nachfrage nach Daten im Zusammenhang mit der Produktgestaltungsphase, die ein erhebliches Potenzial zur Ermöglichung von Zirkularität durch vorgelagerte Interventionen und systemische Veränderungen bietet Hapuwatte & Jawahir (2021).

Soziale und ökologische Indikatoren sind weniger gut definiert und werden seltener in Leistungsmessungsrahmen für Kreislauffähigkeit integriert. Dies wird in

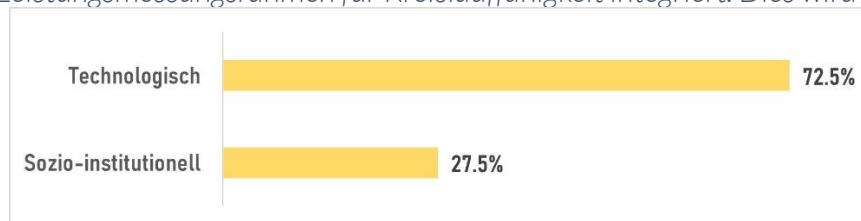


Abbildung 21 veranschaulicht, die eine deutliche Dominanz technologischer Daten zeigt, insbesondere solcher, die sich auf Betriebs- und Herstellungsprozesse beziehen, im Vergleich zu managementbezogenen Daten sowie zu Daten aus anderen Geschäftsbereichen. Rincón-Moreno et al. (2021) heben hervor, dass viele Rahmenwerke der Kreislaufwirtschaft es versäumen, Kreislauffähigkeit mit weiteren wesentlichen Variablen zu verknüpfen, darunter die Schaffung von Arbeitsplätzen, Wettbewerbsvorteile und ökologische Nachhaltigkeit. Dies ist trotz der entscheidenden Bedeutung dieser Zusammenhänge für einen umfassenden Übergang zur Kreislaufwirtschaft zu beobachten, die als grundlegender Paradigmenwechsel vom traditionellen, ineffizienten Wirtschaftsmodell verstanden wird.

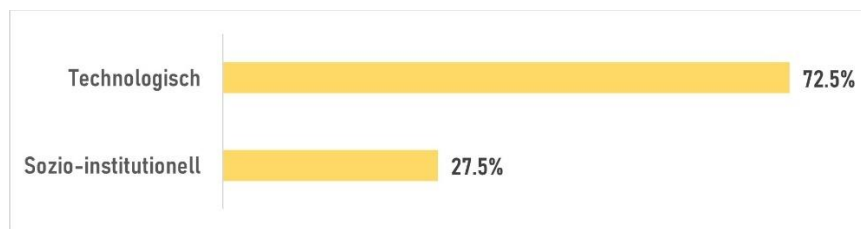


Abbildung 21: Häufigkeit der Nutzung von Daten zur Kreislaufwirtschaft nach technologischer oder sozio-institutioneller Klassifikation (Araujo et al., 2025)

Daher zeigt all dies einen Mangel an hinreichend umfassenden Ansätzen auf Unternehmensebene. Wie von Barastas et al. (2022) indiziert, führt die Vielzahl von Aspekten und Klassifikationen im Zusammenhang mit der Kreislaufwirtschaft auf Mikroebene zu zusätzlichen Herausforderungen für Unternehmen, die neue Systeme zur Leistungsmessung einführen möchten. Dies kann potenziell die erfolgreiche Umsetzung des gesamten Kreislaufwirtschaftskonzepts behindern.

4.3 Ein integriertes Rahmenwerk zur Bewertung der Zirkularität auf Mikro-Ebene

Wie von Papageorgiou et al. (2021) erläutert, stellt der Übergang zur Kreislaufwirtschaft eine multidimensionale und komplexe Herausforderung dar. Daher besteht die Notwendigkeit ganzheitlicher, indikatorbasierter Überwachungssysteme, die in der Lage sind, das Niveau der Zirkularität aus einer systemischen Perspektive zu messen. Eine der wesentlichen Schwächen der von Unternehmen verwendeten Leistungsmesssysteme ist deren traditionelle Fokussierung auf eine enge, eindimensionale Sichtweise. In Leistungsmesssystemen kann diese Einschränkung, wie von (Kaplan & Norton, 1992) beschrieben, durch die Einführung eines ausgewogenen Sets von Kennzahlen adressiert werden (Neely et al., 2000).

Im Einklang mit dieser zentralen Idee wurde im Rahmen des Projekts DACE ein Framework entwickelt, das Leistungsindikatoren umfasst, die aus allen zuvor untersuchten Referenzen ausgewählt wurden. Dabei wurden insbesondere diejenigen berücksichtigt, die sich durch eine starke Übereinstimmung mit den Prinzipien der Kreislaufwirtschaft, eine gute Ausrichtung an CE-Strategien, Robustheit, Anwendbarkeit und Relevanz für den Übergang zu einer Kreislaufwirtschaft auszeichnen.

Massari und Giannoccaro (2023) befürworten die Nutzung von Nachhaltigkeitsberichtsrichtlinien, insbesondere der „Global Reporting Initiative“, als praktikable Lösung zur Messung der Zirkularität. Aus diesem Grund zählen die Nachhaltigkeitsberichtsrichtlinien zu den in dieser Arbeit verwendeten Quellen. Weitere in dieser Arbeit berücksichtigte Nachhaltigkeitsleitfäden umfassen das Sustainability Accounting Standards Board (SASB) und die European Sustainability Reporting Standards (ESRS).

Der Prozess zur Befüllung des Frameworks basierte auf der Einbeziehung von Indikatoren, die alle Strategien der Kreislaufwirtschaft sowie alle Phasen der Wertschöpfungskette des Unternehmens abdecken, mit dem Ziel, die Maßnahmen über die organisatorischen Grenzen hinaus auszudehnen und die Zusammenarbeit mit Partnern stromaufwärts und stromabwärts zu fördern (Abbildung 22). Die Auswahl geeigneter Indikatoren zur Erfassung des Fortschritts in der Kreislaufwirtschaft ist essenziell (Ahmed et al., 2022b).

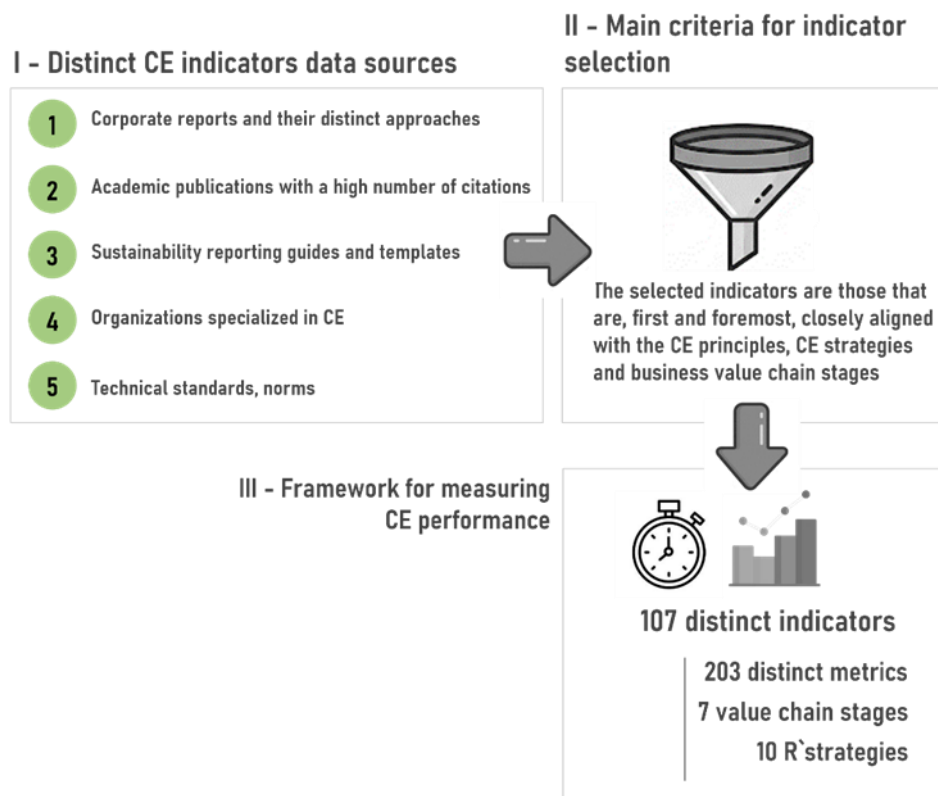


Abbildung 22: Auswahlprozess der Leistungsindikatoren

Eine wichtige Stärke des vorgeschlagenen Frameworks, das Indikatoren aus wissenschaftlichen und praktischen Quellen kombiniert, ist die klare und präzise Definition spezifischer Indikatoren und Kennzahlen. Dies reduziert Unsicherheiten hinsichtlich der zu erfassenden Daten und der Art der erforderlichen Informationen und trägt dazu bei, übermäßig komplexe Indikatoren zu vermeiden, die einen unverhältnismäßig hohen Zeit- und Investitionsaufwand für das Monitoring erfordern. Daten, die in Unternehmensberichten veröffentlicht werden, sind bspw. in der Regel zugänglich und können über die Zeit hinweg konsistent verfolgt werden.

Insgesamt wurden 107 verschiedene Indikatoren ausgewählt, die weiter in zusätzliche Kennzahlen unterteilt werden können. Dadurch erhöht sich die Gesamtzahl der Kennzahlen auf 203. Alle Indikatoren und Kennzahlen sind entsprechend dem Rahmenwerk nach Wertschöpfungskettenstufen sowie den Strategien der Kreislaufwirtschaft organisiert. Zur Erleichterung der Anwendung des Rahmenwerks wurde eine Excel-Tabelle entwickelt, die mehrere Abschnitte umfasst. Das erste Blatt stellt das Tool mit einer kurzen Beschreibung, seinen Hauptkomponenten, Referenzen sowie einem Navigationspanel vor, das zu den anderen Blättern



Reference List of Micro-Level Circular Economy Indicators



Project DACE (Data Competence Center for Circular Economy Data)

How to cite this document: Araujo, J.B., & Viere, T. (2025). *Reference List of Micro-Level Circular Economy Indicators*. [Microsoft Excel file]. <https://doi.org/10.5281/zenodo.15058287>

Created by: Juliano Araujo (conceptualisation and execution), Tobias Viere (conceptualisation) - Institute for Industrial Ecology, Pforzheim University.
Contact: juliano.araujo@hs-pforzheim.de
Date: March, 2025

Purpose of this spreadsheet

The objective of this study is to provide a list of relevant indicators for measuring the performance of companies in circular economy across their entire value chain, considering different production stages, from upstream to downstream.

Content

[Compact indicator list \(with fewer description fields\)](#)
[Complete indicator list](#)
[Representation of circularity indicators across their respective value chain stages](#)

Methodology

The steps for developing this spreadsheet began with a bibliographical review aimed at selecting key references, i.e., those widely cited by authors and companies to date. Next, these references were analyzed, and their indicators were noted in the spreadsheet in the form of specific metrics, with each indicator potentially having multiple metrics. Each metric was then linked to the corresponding stage of the company's value chain. Finally, the circular economy strategy associated with each indicator was also documented, using as references the strategies proposed by Potting et al. (2017), or 9Rs strategies.

Acknowledgments

This work is part of DACE (Data Competence Centre for Circular Economy Data) and receives funding by the German Federal Ministry of Education and Research and the European Union (NextGenerationEU), BMBF Fkz. 16DKZ2056C.

References

[1] Di Maio, F., & Rem, P. C. (2015). A Robust Indicator for Promoting Circular Economy through Recycling. *Journal of Environmental Protection*, 06(10). <https://doi.org/10.4236/jep.2015.610096>
[2] Ellen MacArthur Foundation. (2019). Circulytics - measuring circularity. Circulytics - Measuring Circularity.
[3] EMF. (2019). Material Circularity Indicator (MCI). Ellen MacArthur Foundation. <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/material-circularity-indicator>
[4] European Financial Reporting Advisory Group. (2024). EFRAG IG 3 List of ESRS Data Points.
[5] Evans, J., & Bocken, N. (2013). Circular Economy Toolkit. In Cambridge Institute for Manufacturing. <http://circulareconomytoolkit.org/>

< > Introduction Compact list Full list Indicators by value chain steps +

Abbildung 23: Anfangsabschnitt mit einer Einführung in das Instrument und dessen Inhalte

Die im Leistungsbewertungsrahmen dargestellte Wertschöpfungskette umfasst sechs Phasen: Design, Ressourcen, Produktion, Distribution, Konsum, Sammlung und Ausfluss. Für jede dieser Phasen wurden verschiedene Indikatoren ausgewählt, die mit den spezifischen Merkmalen und Realitäten der Wertschöpfung und -erhaltung übereinstimmen. So ist bspw. die Designphase, die eng mit Innovation und dem Einsatz neuer Technologien verbunden ist, durch eine starke Präsenz von Strategien gekennzeichnet, die sich auf den intelligenten Gebrauch von Materialien und Produkten beziehen, insbesondere auf die Strategien Vermeiden, Überdenken und Reduzieren. Zur Visualisierung der Wertschöpfungskette in Verbindung mit den Indikatoren und den



entsprechenden Strategien wurde ein spezielles Arbeitsblatt im Tool entwickelt. Über

Representation of circularity indicators across their respective value chain stages

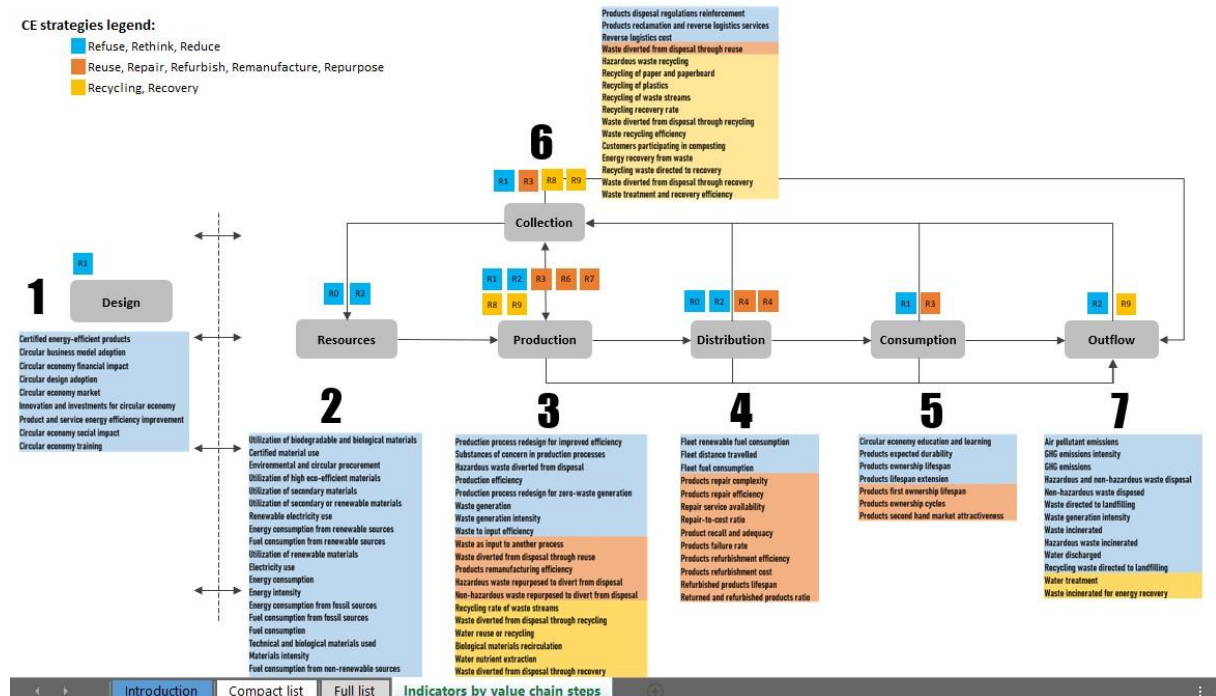
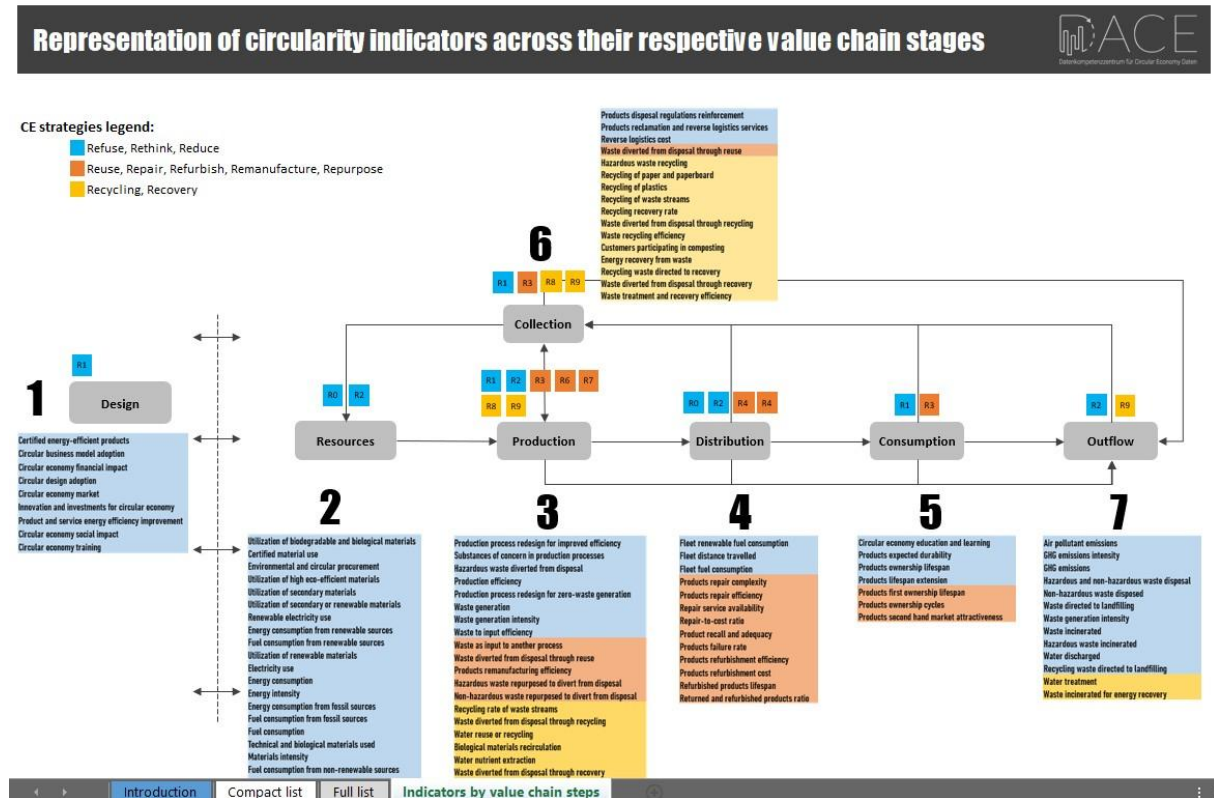


Abbildung 24 können die Nutzer deutlich erkennen, wie die Strategien der Kreislaufwirtschaft über die verschiedenen Phasen der Wertschöpfungskette verteilt sind.



Reference List of Micro-Level Circular Economy Indicators (full list)

Notes: Reference table for circularity indicators at the micro level, with details on possible metrics and their association with the most relevant stage of the value chain. The list of indicators and metrics is not exhaustive, although it includes the most well-known references. It includes both sustainability reporting metrics and metrics from guidelines and reference models, such as ISO, as well as jointly academic references.

Value Chain data	R Strategy data	Indicator	Metrics	Unit	Source	Indicator Reference	ISO 59020	CTI V4.0	Circularity 6	Other sources
1 Design	1 Rethink	Certified energy-efficient products	% of eligible products, by revenue, certified to an energy efficiency < %	%	SASB	Electrical & Electronic Equipment: RT-EE-410a.2, IF-HB-410a.1, Hardware: TC-HW-410a.3				
1 Design	1 Rethink	Circular business model adoption	% of revenue from new circular business models adoption	%	Franco et al. 2021			Value the Loop: CTI revenue (product)		
1 Design	1 Rethink	Circular economy financial impact	% of service revenue from circular services	%	Circularity 6	Theme 7: Services: 7		Value the Loop: CTI revenue (product)		
1 Design	1 Rethink	Circular design adoption	Cost reduction from circular initiatives	%	Rossi et al. 2020					
1 Design	1 Rethink	Circular design adoption	% (by mass) of physical products designed along circular economy %	%	Circularity 6	Theme 6: Products and Materials: 6d				Theme 6: Products and Materials: 6d
1 Design	1 Rethink	Circular economy market	Total addressable market and share of market for products that red %	%	SASB	Construction materials: EM-OM-410a.1				
1 Design	1 Rethink	Innovation and investments for circular economy	Percentage of CE patents	%	Rincón-Moreno					
1 Design	1 Rethink	Circular economy market	Revenue generation from circular initiatives	%	Rossi et al. 2020			Value the Loop: CTI revenue (product)		
1 Design	1 Rethink	Circular economy financial impact	Taxation or regulatory milestones	%	Rossi et al. 2020					
1 Design	1 Rethink	Innovation and investments for circular economy	Quantify investments from the innovation process	%	Rossi et al. 2020					
1 Design	1 Rethink	Circular design adoption	Total weight of packaging	Mass	SASB	Alcoholic Beverages: FB-AB-410a.1, CG-HP-410a.1				
1 Design	1 Rethink	Circular design adoption	% of packaging made from recycled or renewable materials	%	SASB	Alcoholic Beverages A.2.3 Average re				Theme 6: Products and Materials: 6a
1 Design	1 Rethink	Circular design adoption	% packaging that is recyclable, reusable, or compostable	%	SASB	Alcoholic Beverages B.3.2 Per cent d				Theme 6: Products and Materials: 6a
1 Design	1 Rethink	Circular design adoption	Level of components, connectors, modules and leads standardisation	%	Evans & Bocken, 2013					
1 Design	1 Rethink	Circular design adoption	Level of modular parts, allowing switch in-switch out	%	Evans & Bocken, 2013					
1 Design	1 Rethink	Circular economy financial impact	Material value recycled from EOL product(s) versus material value needed for re-pro	%	Evans & Bocken, 2013					
1 Design	1 Rethink	Circular design adoption	% of time added in lifespan of product or material	%	Franco et al. 2021			A.3.2 Average lif		Optimize the Loop: Actual lifetime
1 Design	1 Rethink	Circular economy financial impact	Disclosure of quantitative information about anticipated financial effe	%	ESRS	E5-6_01				Value the Loop: CTI revenue (product)
1 Design	1 Rethink	Circular economy market	Revenue from products designed to increase fuel efficiency or reduce	%	SASB	Auto Parts: TR-AP-410a.1				Value the Loop: CTI revenue (product)
1 Design	1 Rethink	Circular design adoption	Possibility to upgrade products and parts	%	Evans & Bocken, 2013					Close the Loop: % recovery potential * % actual recovery
1 Design	1 Rethink	Product and service energy efficiency improvement	Reductions in energy requirements of sold products and services	Energy	GR	302-5				Close the Loop: Mass of each inflow type
1 Design	1 Rethink	Circular design adoption	% products design for disassembly adequacy and capability	%	Evans & Bocken, 2013					
1 Design	1 Rethink	Circular design adoption	Product(s) functional unit versus industry average	%	MCI					
1 Design	1 Rethink	Circular economy market	Availability of market to sell products as a service	%	Evans & Bocken, 2013					
1 Design	1 Rethink	Circular design adoption	% of products sold that are recyclable or reusable	%	SASB	Fuel Cells & Industr	B.3.2 Per cent d			Close the Loop: % recovery potential * % actual recovery
1 Design	1 Rethink	Circular design adoption	% of products sold that are recyclable	%	SASB	Auto Parts: TR-AP-410a.1				Close the Loop: % recovery potential * % actual recovery

Abbildung 25: Verteilung der CE-Indikatoren nach Wertschöpfungsstufen



Der zentrale Bestandteil des Instruments ist jedoch das Arbeitsblatt, das eine kompaktere Liste von Indikatoren bereitstellt und es den Nutzern ermöglicht, diese nach den wichtigsten Aspekten zu filtern: der Wertschöpfungskettenstufe, der Strategie der Kreislaufwirtschaft, den Namen der Indikatoren und Metriken sowie schließlich deren Referenzquelle (siehe

Reference List of Micro-Level Circular Economy Indicators (compact list)

Select the filters of interest to obtain the corresponding indicators. It is possible to use multiple filters simultaneously

Value Chain

- 1. Design
- 3. Production
- 5. Consumption or use
- 7. Resource outflows

CE Strategy

- 0. Refuse
- 3. Reuse
- 6. Remanufacture
- 9. Recover

CE Strategy

- 1. Rethink
- 4. Repair
- 7. Repurpose
- NA

CE Strategy

- 2. Reduce
- 5. Refurbish
- 8. Recycling

Number of metrics
203

Value Chain	CE Strategy	Indicator	Metrics	Source
1. Design	1. Rethink	Certified energy-efficient products	% of eligible products, by revenue, certified to an energy efficiency certification	SASB
1. Design	1. Rethink	Circular business model adoption	% of revenue from new circular business models adoption	Franco et al. 2021
1. Design	1. Rethink	Circular business model adoption	% of service revenue from circular services	Circulytics ©
1. Design	1. Rethink	Circular economy financial impact	Cost reduction from circular initiatives	Rossi et al. 2020
1. Design	1. Rethink	Circular design adoption	% (by mass) of physical products designed along circular economy principles	Circulytics ©
1. Design	1. Rethink	Circular economy market	Total addressable market and share of market for products that reduce energy, water or materials	SASB
1. Design	1. Rethink	Innovation and investments for circular economy	Percentage of CE patents	Rincón-Moreno
1. Design	1. Rethink	Circular economy market	Revenue generation from circular initiatives	Rossi et al. 2020
1. Design	1. Rethink	Circular economy financial impact	Taxation or regulatory milestones	Rossi et al. 2020
1. Design	1. Rethink	Innovation and investments for circular economy	Quantify investments from the innovation process	Rossi et al. 2020
1. Design	1. Rethink	Circular design adoption	Total weight of packaging	SASB
1. Design	1. Rethink	Circular design adoption	% of packaging made from recycled or renewable materials	SASB
1. Design	1. Rethink	Circular design adoption	% packaging that is recyclable, reusable, or compostable	SASB
1. Design	1. Rethink	Circular design adoption	Level of components, connectors, modules and leads standardisation	Evans & Bocken, 2013
1. Design	1. Rethink	Circular design adoption	Level of modular parts, allowing switch in-switch out	Evans & Bocken, 2013
1. Design	1. Rethink	Circular economy financial impact	Material value recycled from EOL product(s) versus material value needed for re-producing EC	Evans & Bocken, 2013
1. Design	1. Rethink	Circular design adoption	% of time added in lifespan of product or material	Franco et al. 2021
1. Design	1. Rethink	Circular economy financial impact	Disclosure of quantitative information about anticipated financial effects of material risks and	ESRS
1. Design	1. Rethink	Circular economy market	Revenue from products designed to increase fuel efficiency or reduce emissions	SASB

[Introduction](#) | [Compact list](#) | [Full list](#) | [Indicators by value chain steps](#)

Abbildung 26).



Reference List of Micro-Level Circular Economy Indicators (compact list)				
Select the filters of interest to obtain the corresponding indicators. It is possible to use multiple filters simultaneously				
Value Chain	CE Strategy		Number of metrics	
1. Design	2. Resource inflows	0. Refuse	1. Rethink	2. Reduce
3. Production	4. Distribution and assistance	3. Reuse	4. Repair	5. Refurbish
5. Consumption or use	6. Collection	6. Remanufacture	7. Repurpose	8. Recycling
7. Resource outflows		9. Recover	NA	
203				
Value Chain	CE Strategy	Indicator	Metrics	Source
1. Design	1. Rethink	Certified energy-efficient products	% of eligible products, by revenue, certified to an energy efficiency certification	SASB
1. Design	1. Rethink	Circular business model adoption	% of revenue from new circular business models adoption	Franco et al. 2021
1. Design	1. Rethink	Circular business model adoption	% of service revenue from circular services	Circulytics @
1. Design	1. Rethink	Circular economy financial impact	Cost reduction from circular initiatives	Rossi et al. 2020
1. Design	1. Rethink	Circular design adoption	% (by mass) of physical products designed along circular economy principles	Circulytics @
1. Design	1. Rethink	Circular economy market	Total addressable market and share of market for products that reduce energy, water or materials	SASB
1. Design	1. Rethink	Innovation and investments for circular economy	Percentage of CE patents	Rincón-Moreno
1. Design	1. Rethink	Circular economy market	Revenue generation from circular initiatives	Rossi et al. 2020
1. Design	1. Rethink	Circular economy financial impact	Taxation or regulatory milestones	Rossi et al. 2020
1. Design	1. Rethink	Innovation and investments for circular economy	Quantify investments from the innovation process	Rossi et al. 2020
1. Design	1. Rethink	Circular design adoption	Total weight of packaging	SASB
1. Design	1. Rethink	Circular design adoption	% of packaging made from recycled or renewable materials	SASB
1. Design	1. Rethink	Circular design adoption	% packaging that is recyclable, reusable, or compostable	SASB
1. Design	1. Rethink	Circular design adoption	Level of components, connectors, modules and leads standardisation	Evans & Bocken, 2013
1. Design	1. Rethink	Circular design adoption	Level of modular parts, allowing switch-in-switch out	Evans & Bocken, 2013
1. Design	1. Rethink	Circular economy financial impact	Material value recycled from EOL product(s) versus material value needed for re-producing	Evans & Bocken, 2013
1. Design	1. Rethink	Circular design adoption	% of time added in lifespan of product or material	Franco et al. 2021
1. Design	1. Rethink	Circular economy financial impact	Disclosure of quantitative information about anticipated financial effects of material risks and	ESRS
1. Design	1. Rethink	Circular economy market	Revenue from products designed to increase fuel efficiency or reduce emissions	SASB
1. Design	1. Rethink	Circular design adoption	Possibility to upgrade products and parts	Evans & Bocken, 2013

Abbildung 26: Hauptblatt mit Indikatoren zur Kreislaufwirtschaft, dargestellt in einem Format, das eine einfachere Filterung nach den Schlüsselmerkmalen ermöglicht

Ein wesentlicher Beitrag zu dem vorgeschlagenen Rahmen besteht in der Entwicklung eines umfassenderen Systems zur Leistungsbewertung, das drei miteinander verbundene Komponenten integriert: Prozesse der Wertschöpfungskette, strategische Entscheidungen zur Kreislaufwirtschaft und Zirkularitätsindikatoren. Diese Struktur bietet einen ganzheitlichen Ansatz zur Erfassung der Merkmale der Kreislaufwirtschaft in verschiedenen Sektoren und verbessert gleichzeitig die Interpretierbarkeit über verschiedene Geschäftsdimensionen hinweg. Sie ermöglicht den zwischen Unternehmen und verschiedenen Sektoren sowie die Verfolgung der Leistung im Zeitverlauf.



Ein Merkmal des vorgeschlagenen Rahmens besteht in seiner Fähigkeit, auf bereits in Unternehmensberichten, wie etwa Nachhaltigkeitsberichten, enthaltene Daten zurückzugreifen, um die zirkulären Aktivitäten der Unternehmen systematisch zu erfassen und zu steuern. Die Nachhaltigkeitsberichterstattung der Unternehmen kann durch die Perspektive der Kreislaufwirtschaft neu interpretiert werden, wodurch der Bedarf zur Entwicklung neuer Datenmanagementfähigkeiten reduziert wird. Die gleichzeitige Verwendung von Primär- und Sekundärdaten stellt die Zukunft von Forschung und Bewertung dar (vgl. Massari und Giannoccaro).

Die Excel-Tabelle, die das Leistungsbewertungsframework für die Kreislaufwirtschaft enthält, ist für Dritte über das Forschungsdaten-Repository Zenodo frei zugänglich (Bezerra de Araujo & Viere, 2025). Sie wurde bereits über 130-mal von Nutzern aus dem Unternehmenssektor und der Forschungsgemeinschaft heruntergeladen (siehe Link in der Literaturliste).

4.4 Umsetzung des Bewertungsrahmens in einer sektorspezifischen Fallstudie

Der nächste Schritt nach der Entwicklung des Leistungsbewertungsrahmens für die Kreislaufwirtschaft bestand darin, zu prüfen, ob seine Anwendung Unternehmen in der Praxis unterstützen kann. Zu diesem Zweck wurde eine Fallstudie im Chemiesektor durchgeführt, mit besonderem Fokus auf den Teilsektor Kunststoffe und Verpackungen. Dieser Teilsektor wurde ausgewählt, um eine Übereinstimmung mit der zuvor auf Nano-Ebene durchgeführten Fallstudie sicherzustellen. Insgesamt wurden vier führende Unternehmen dieses Teilsektors für die Analyse ausgewählt.

Die Leistungsdaten dieser Unternehmen wurden aus Unternehmensberichten gewonnen, insbesondere aus integrierten Berichten, die ESG-Informationen enthalten und gemäß Nachhaltigkeitsberichtsstandards wie GRI, SASB und ESRS strukturiert sind. Eine detaillierte Prüfung dieser Berichte wurde durchgeführt, um Indikatoren der Zirkularität zu identifizieren, wie sie im Bewertungsrahmen definiert sind. Die meisten dieser Indikatoren stammen aus den Berichtsstandards selbst, wobei die Auswahl nicht ausschließlich darauf beschränkt war.

Obwohl die analysierte Unternehmensstichprobe nicht repräsentativ für den gesamten globalen Sektor ist, umfasst sie einige der wichtigsten europäischen Akteure der Branche. Damit erfüllt sie ausreichend das Hauptziel, das Bewertungsrahmenwerk zur Leistung der Kreislaufwirtschaft zu testen und bietet zugleich aussagekräftige Einblicke in den Reifegrad und die Praxis der Kreislaufwirtschaft in diesem Sektor.

4.4.1 Aktueller Stand der Leistungsbewertung der Kreislaufwirtschaft im Kunststoff-Teilsektor

Wie bereits erläutert, bestand die Datenquelle für die Fallstudie aus Unternehmensberichten, aus denen Sekundärdaten erhoben wurden. Diese Berichte wurden sorgfältig analysiert, um alle offengelegten Informationen zu erfassen, wobei der Bewertungsrahmen als Referenz verwendet wurde. Die gesammelten Daten wurden anschließend entsprechend der jeweiligen Stufe der Wertschöpfungskette und der spezifischen angewandten Kreislaufwirtschaftsstrategie organisiert.



Insgesamt enthielten die integrierten Berichte der analysierten Unternehmen 37 verschiedene Indikatoren zur Kreislaufwirtschaft, verteilt auf unterschiedliche Wertschöpfungsstufen und verschiedene Strategien der Kreislaufwirtschaft.

Value Chain	R'strategie	Indicators	Metrics	Frequen
Design	Rethink	Circular economy market	Total addressable market and share of market for products that reduce energy, water or material impacts during usage or production	1
Resource inflow	Refuse	Energy consumption from renewable sources	% of renewable sources in total energy consumption	4
			% renewable electricity consumed	3
		Utilization of materials	% of raw materials from recycled materials	2
			% of raw materials from renewable materials	1
			Increase in the use of renewable materials	1
		Environmental and circular procurement	% of new suppliers that were screened using environmental criteria	3
	Reduce	Energy consumption	Total energy consumed (vs. previous year)	4
		Energy intensity	Energy intensity ratio for the organization	3
		Energy consumption from fossil sources	% energy consumption from fossil sources	1
		Water consumption	Total water consumed	3
		Water withdraw	Total water withdrawn	4
Production	Rethink	Production process redesign for zero-waste	% of hazardous waste diverted from disposal	2
			% of nonhazardous waste diverted from disposal	2
	Reduce	Waste generation	Reductions in waste generation	2
			Hazardous waste generation reduction y-o-y	2
			Nonhazardous waste generation reduction y-o-y	2
			Total waste generated	2
	Reuse	Waste diverted from disposal through reuse	% hazardous waste diverted from disposal	2
			% nonhazardous waste diverted from disposal	2
	Recycle	Recycling rate of waste streams	% of waste streams recycled	3
		Hazardous waste recycling	Weight of hazardous waste recycled	3
			% of hazardous waste recycled	3
		Waste diverted from disposal through recycling	Total weight of waste diverted from disposal	3
	Recover	Waste diverted from disposal through recovery	Ratio (on-site or internal) water reuse or recirculation	1
			Total weight of hazardous waste diverted from disposal	3
			% of hazardous waste recovered	3
Resource outflow	Reduce	GHG emissions	Total weight of Nonhazardous waste diverted from disposal	3
			Gross direct GHG emissions in metric tons of CO2 equivalent	4
			Achieved GHG emissions reductions [1-4]	4
			Reduction in specific Scope 3 greenhouse gas emissions [1,3-4]	4
		GHG emissions intensity	Reduction in specific Scope 1 and 2 greenhouse gas emissions [3,4]	4
			The ratio of total greenhouse gas (GHG) emissions per ton of sales of product, or revenue	4
		Hazardous and non-hazardous waste disposal	Non-hazardous waste disposed	3
			Hazardous waste disposed	3
		Hazardous waste incinerated	% Amount of waste incinerated hazardous	3
		Waste incinerated	Amount of waste incinerated (without energy recovery)	3

Abbildung 27 zeigt alle identifizierten Indikatoren, begleitet von einer speziellen Spalte zur Bewertung ihrer Häufigkeit in Berichten. Daraus lässt sich schließen, inwieweit die jeweiligen



Indikatoren von mehreren Unternehmen priorisiert werden oder nur von einem einzelnen Unternehmen verwendet werden.

Value Chain	R'strategie	Indicators	Metrics	Frequenz
Design	Rethink	Circular economy market	Total addressable market and share of market for products that reduce energy, water or material impacts during usage or production	1
Resource inflow	Refuse	Energy consumption from renewable sources	% of renewable sources in total energy consumption	4
			% renewable electricity consumed	3
		Utilization of materials	% of raw materials from recycled materials	2
			% of raw materials from renewable materials	1
			Increase in the use of renewable materials	1
		Environmental and circular procurement	% of new suppliers that were screened using environmental criteria	3
	Reduce	Energy consumption	Total energy consumed (vs. previous year)	4
		Energy intensity	Energy intensity ratio for the organization	3
		Energy consumption from fossil sources	% energy consumption from fossil sources	1
		Water consumption	Total water consumed	3
		Water withdraw	Total water withdrawn	4
Production	Rethink	Production process redesign for zero-waste	% of hazardous waste diverted from disposal	2
			% of nonhazardous waste diverted from disposal	2
	Reduce	Waste generation	Reductions in waste generation	2
			Hazardous waste generation reduction y-o-y	2
			Nonhazardous waste generation reduction y-o-y	2
			Total waste generated	2
	Reuse	Waste diverted from disposal through reuse	% hazardous waste diverted from disposal	2
			% nonhazardous waste diverted from disposal	2
	Recycle	Recycling rate of waste streams	% of waste streams recycled	3
		Hazardous waste recycling	Weight of hazardous waste recycled	3
			% of hazardous waste recycled	3
		Waste diverted from disposal through recycling	Total weight of waste diverted from disposal	3
	Recover	Waste diverted from disposal through recovery	Ratio (on-site or internal) water reuse or recirculation	1
			Total weight of hazardous waste diverted from disposal	3
			% of hazardous waste recovered	3
			Total weight of Nonhazardous waste diverted from disposal	3
Resource outflow	Reduce	GHG emissions	Gross direct GHG emissions in metric tons of CO2 equivalent	4
			Achieved GHG emissions reductions [1-4]	4
			Reduction in specific Scope 3 greenhouse gas emissions [1,3-4]	4
			Reduction in specific Scope 1 and 2 greenhouse gas emissions [3,4]	4
		GHG emissions intensity	The ratio of total greenhouse gas (GHG) emissions per ton of sales of product, or revenue	4
		Hazardous and non-hazardous waste disposal	Non-hazardous waste disposed	3
			Hazardous waste disposed	3
		Hazardous waste incinerated	% Amount of waste incinerated hazardous	3
		Waste incinerated	Amount of waste incinerated (without energy recovery)	3

Abbildung 27: Von den analysierten Unternehmen im Kunststoff-Teilsektor überwachte Indikatoren der Kreislaufwirtschaft

Eine erste bemerkenswerte Erkenntnis betrifft die Häufigkeit der, von den Unternehmen berichteten, Indikatoren über die verschiedenen Phasen der Wertschöpfungskette hinweg. Wie in Abbildung 28 dargestellt, ist die überwiegende Mehrheit der Indikatoren mit den Produktions- und End-of-Life-Phasen (Ausgangsphase) verbunden. Die Ressourcenphase (Eingangsphase) folgt als relevante, wenn auch etwas weniger betonte Phase. Andere Phasen der Wertschöpfungskette, insbesondere Design, Vertrieb, Kunden und Sammlung werden nicht in dem Maße priorisiert, dass Unternehmen spezifische Leistungsindikatoren für diese definieren, obwohl sie für die Schaffung und Erhaltung gemeinsamen Wertes von entscheidender Bedeutung sind. Dies deutet darauf hin, dass ihre Strategien zur Kreislaufwirtschaft wahrscheinlich auf Aktivitäten innerhalb ihrer eigenen operativen Grenzen fokussiert sind, mit vergleichsweise geringerem Augenmerk auf vorgelagerte und nachgelagerte Partner.

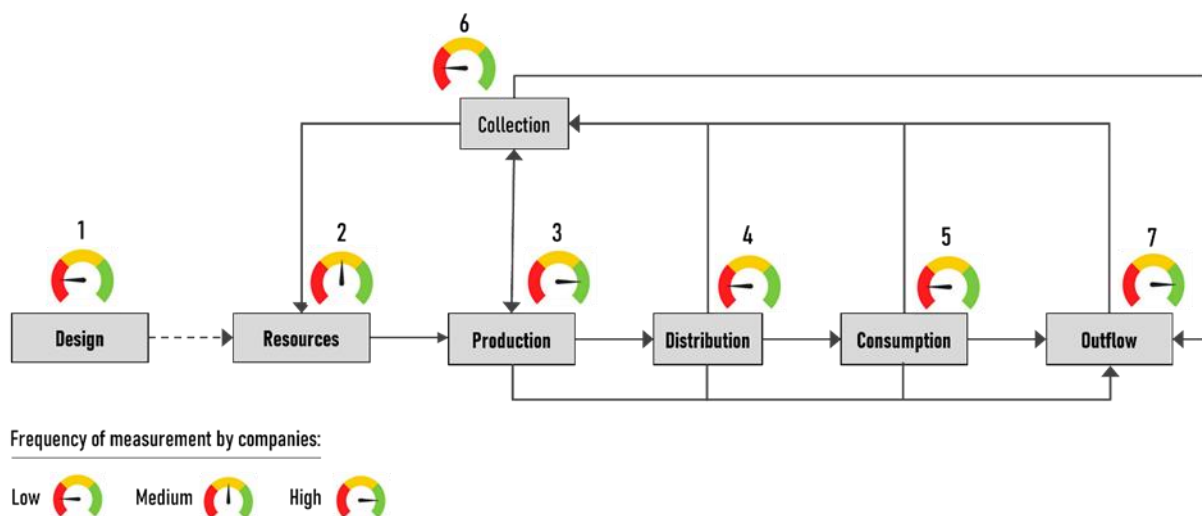


Abbildung 28: Häufigkeit der Messung der Leistung der Kreislaufwirtschaft über die Wertschöpfungsstufen bei den untersuchten Unternehmen

Es ist wichtig zu beachten, dass diese Ergebnisse im Kontext des spezifisch untersuchten Teilsektors interpretiert werden sollten. Die Relevanz und Auswahl von Indikatoren zur Kreislaufwirtschaft variieren in der Regel je nach Branche, abhängig von den für den jeweiligen Sektor relevantesten materiellen Fragestellungen. Dennoch bleibt es unerlässlich, dass die meisten Stufen der Wertschöpfungskette bei der Umsetzung von Kreislaufwirtschaftsstrategien berücksichtigt werden. Folglich sollten relevante Indikatoren für jede Stufe in die Leistungsmessungssysteme der Unternehmen aufgenommen werden, um eine umfassende Bewertung der Zirkularität zu gewährleisten. Dies wurde in der analysierten Stichprobe von Unternehmen nicht beobachtet, was auf einen Reifegrad der Kreislaufwirtschaft hinweist, der hinter den Erwartungen zurückbleibt.

Der nächste Schritt bestand in der Analyse der Häufigkeit von Indikatoren nach Art der Kreislaufwirtschaftsstrategie (Abbildung 29). Wie dargestellt neigen Unternehmen dazu, bestimmte Strategien zu bevorzugen, teilweise bedingt durch den Sektor, in dem sie tätig sind, und dessen jeweilige Prioritäten. Die Strategien „Reduzieren“ und „Recyceln“ waren am prominentesten, was hauptsächlich auf Programme zur Verbesserung der Ressourceneffizienz zurückzuführen ist, die tendenziell zu geringeren Umweltauswirkungen und verbesserten wirtschaftlichen Erträgen führen. Besonders hervorzuheben ist auch die Strategie „Verweigern“, bei der Unternehmen bspw. bestreben, Primärressourcen durch Sekundär- oder nachwachsende Materialien zu ersetzen.

Einige Strategien verdienen von den Unternehmen stärkere Beachtung, insbesondere jene im Bereich „Rethink“, die mit neuen und verbesserten Methoden der Produktentwicklung und Vermarktung verbunden sind, wie z. B. zirkuläre Geschäftsmodelle. Innovative zirkuläre Praktiken wurden in der untersuchten Stichprobe von Unternehmen nicht häufig beobachtet.

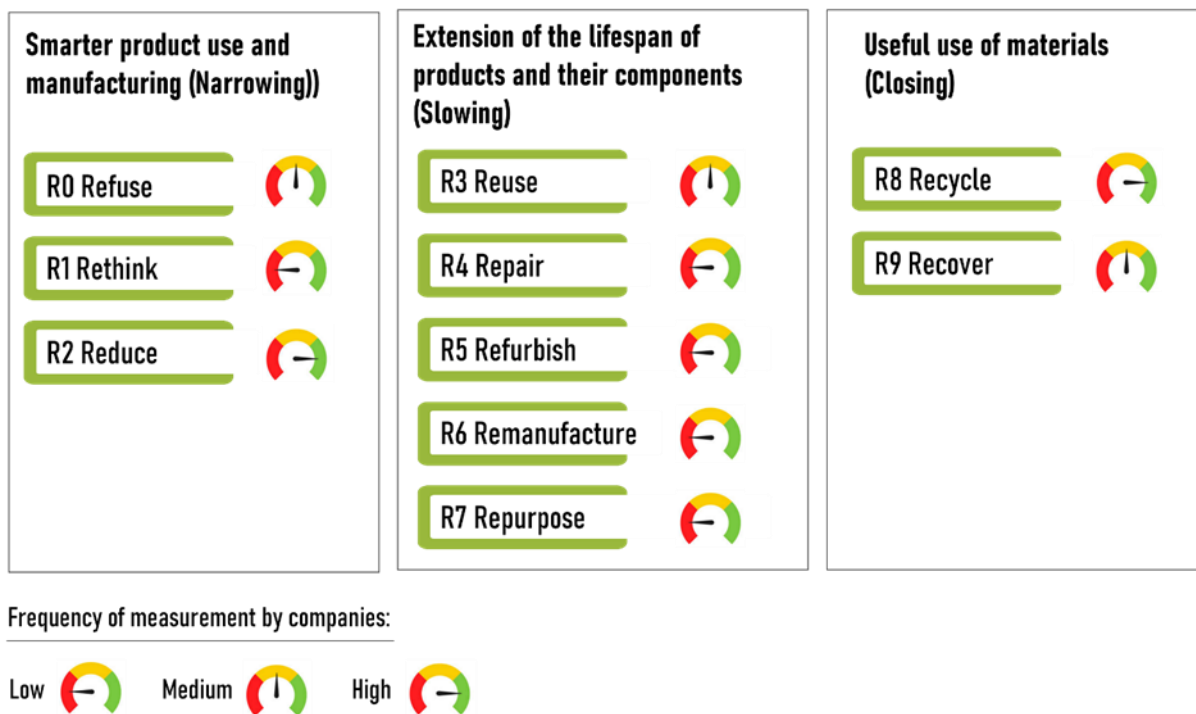


Abbildung 29: Häufigkeit der Leistungsmessung in Bezug auf Kreislaufwirtschaftsstrategien bei den untersuchten Unternehmen

Abschließend führt die Analyse, der von den Unternehmen am häufigsten berichteten und priorisierten Indikatoren zu folgender Liste: Energieverbrauch aus erneuerbaren Quellen, Nutzung von Materialien (erneuerbar und recycelt), Gesamtenergieverbrauch, Wasserentnahme sowie Treibhausgasemissionen (THG-Emissionen).



4.4.2 Empfohlene Indikatoren der Kreislaufwirtschaft zur Erfassung und Überwachung

Ein weiteres Ziel der Fallstudie besteht darin, neue Leistungsindikatoren vorzuschlagen, die auf den spezifischen Teilsektor zugeschnitten sind, in dem die Unternehmen tätig sind, und dabei wichtige Dimensionen der Kreislaufwirtschaft zu berücksichtigen, die bisher nicht erfasst wurden.

Insgesamt wurden 28 neue Indikatoren vorgeschlagen, die von den Unternehmen überwacht werden sollen, mit dem Ziel, ein umfassenderes Verständnis ihres Leistungsniveaus in Bezug auf

Value Chain	R'strategies	Indicators	Metrics
Design	Rethink	Circular design adoption	% of products sold that are recyclable or reusable
		Circular design adoption	% of products with less CO2 by customers, consumers and suppliers
		Circular business model adoption	% of revenue from new circular business models adoption
		Circular economy financial impact	Cost reduction from circular initiatives
		Innovation and investments for circular economy	% of CE patents
		Innovation and investments for circular economy	Quantify investments from the innovation process
Resource inflow	Refuse	Fuel consumption from renewable sources	Fuel consumption from renewable sources
		Fuel consumption from renewable sources	Increase in the use of renewable fuel
		Utilization of materials	The rates of recyclable content in products
		Utilization of secondary or renewable materials	% packaging made from recycled or renewable materials
		Utilization of biodegradagle and biological materials	% of biological materials (and biofuels used for non-energy purposes)
	Reduce	Fuel consumption from fossil sources	Fuel consumption from fossil sources
		Fuel consumption from fossil sources	% of fossil sources in total energy consumption
		Water intensity	Water intensity ratio
Production	Rethink	Substances of concern in production processes	Substances of concern that are used during production or that are procured
		Production process redesign for improved efficiency	Reduction in energy consumption from process redesign; conversion and retrofitting of equipment; changes in behavior; operational changes
	Recycle	Water reuse or recycling	Total water recycled and reused
		Water nutrient extraction	Nutrient extraction from discharged water
		Biological materials recirculation	% actual recirculation of outflow in the biological cycle
Consumption	Rethink	Products expected durability	Disclosure of the expected durability of the products placed on the market, in relation to the industry average for each product group
Collection	Rethink	Products reclamation and reverse logistics services	Weight of end-of-life material recovered
	Reuse	Waste diverted from disposal through reuse	Total weight of waste diverted from disposal
	Recycle	Recycling of plastics	Percentage of recycling rate of plastic waste
		Recycling of waste streams	% of waste streams recycled
		Waste diverted from disposal through recycling	Total weight of waste diverted from disposal
	Recover	Energy recovery from waste	% of waste used for energy recovery
		Energy recovery from waste	% Amount of waste incinerated used for energy recovery
Recycling waste directed to recovery		Waste from recycling for recovery processes	

Abbildung 30).

Dieser Indikatoreinsatz legt einen stärkeren Fokus auf Phasen der Wertschöpfungskette, die zuvor unterrepräsentiert oder ganz vernachlässigt wurden, wie z. B. Design und Sammlung, und erweitert somit den Umfang der Leistungsbewertung im Rahmen der Kreislaufwirtschaft. Ebenso werden Strategien der Kreislaufwirtschaft, die bisher nur begrenzt berücksichtigt wurden, durch Indikatoren abgedeckt, bspw. die Strategie Rethink. Es ist wichtig zu betonen, dass diese vorgeschlagenen Indikatoren nur dann sinnvoll sind, wenn sie von den Unternehmen zuvor im Rahmen ihrer langfristigen Strategien internalisiert wurden.



Value Chain	R'strategies	Indicators	Metrics
Design	Rethink	Circular design adoption	% of products sold that are recyclable or reusable
		Circular design adoption	% of products with less CO2 by customers, consumers and suppliers
		Circular business model adoption	% of revenue from new circular business models adoption
		Circular economy financial impact	Cost reduction from circular initiatives
		Innovation and investments for circular economy	% of CE patents
		Innovation and investments for circular economy	Quantify investments from the innovation process
Resource inflow	Refuse	Fuel consumption from renewable sources	Fuel consumption from renewable sources
		Fuel consumption from renewable sources	Increase in the use of renewable fuel
		Utilization of materials	The rates of recyclable content in products
		Utilization of secondary or renewable materials	% packaging made from recycled or renewable materials
		Utilization of biodegradable and biological materials	% of biological materials (and biofuels used for non-energy purposes)
	Reduce	Fuel consumption from fossil sources	Fuel consumption from fossil sources
		Fuel consumption from fossil sources	% of fossil sources in total energy consumption
		Water intensity	Water intensity ratio
Production	Rethink	Substances of concern in production processes	Substances of concern that are used during production or that are procured
		Production process redesign for improved efficiency	Reduction in energy consumption from process redesign; conversion and retrofitting of equipment; changes in behavior; operational changes
	Recycle	Water reuse or recycling	Total water recycled and reused
		Water nutrient extraction	Nutrient extraction from discharged water
		Biological materials recirculation	% actual recirculation of outflow in the biological cycle
Consumption	Rethink	Products expected durability	Disclosure of the expected durability of the products placed on the market, in relation to the industry average for each product group
Collection	Rethink	Products reclamation and reverse logistics services	Weight of end-of-life material recovered
	Reuse	Waste diverted from disposal through reuse	Total weight of waste diverted from disposal
	Recycle	Recycling of plastics	Percentage of recycling rate of plastic waste
		Recycling of waste streams	% of waste streams recycled
		Waste diverted from disposal through recycling	Total weight of waste diverted from disposal
	Recover	Energy recovery from waste	% of waste used for energy recovery
		Energy recovery from waste	% Amount of waste incinerated used for energy recovery
		Recycling waste directed to recovery	Waste from recycling for recovery processes

Abbildung 30: Vorgeschlagene Indikatoren, die für die Fallstudie relevant sind, aber nicht berichtet wurden

Ein Aspekt, der durch Indikatoren bisher überhaupt nicht berücksichtigt wird, aber grundlegend für die Umsetzung von Zirkularität ist, ist die Einführung zirkulärer Innovationsdesign-Praktiken. Ein weiterer wichtiger Punkt betrifft die Einführung zirkulärer Geschäftsmodelle sowie die Förderung von Innovationspraktiken bei Produkten und Prozessen. Unter Berücksichtigung der Ressourcen, die in die Produktion einfließen, sollte ein stärkerer Fokus auf die Nutzung erneuerbarer und sekundärer Materialien sowie – insofern sinnvoll – auf den Einsatz erneuerbarer Kraftstoffe gelegt werden. Leider werden diese wichtigen Aspekte der Kreislaufwirtschaft von den in der Stichprobe untersuchten Unternehmen nicht erfasst. Schließlich ist ein grundlegender Ressourceneinsatz, der kaum thematisiert wird, die Wasserverbrauchsintensität. Die Unternehmen scheinen zögerlich zu sein, ihren tatsächlichen Wasserverbrauch im Verhältnis zum Wert, den sie für die Stakeholder schaffen, offenzulegen, und berichten oft nur über den Wasserverbrauch in absoluten Zahlen. In der Produktionsphase könnte den Unternehmensaktivitäten, die auf die Neugestaltung von Prozessen zur Verbesserung der Ressourceneffizienz abzielen, größere Aufmerksamkeit geschenkt werden, insbesondere in Bezug auf den Wasserverbrauch und biologische Materialien.

In der Verbrauchsphase enthalten die Berichte keine Indikatoren, die die potenzielle Produktlebensdauer oder eine intelligentere Nutzung aufzeigen, was für die Kreislaufwirtschaft von großem Wert wäre. Schließlich könnten in der Sammelphase verschiedene Indikatoren konstruktiv für die Kreislaufwirtschaft implementiert werden, wie bspw. die Quote der Produkte,



die am Lebensende zurückgewonnen werden, der Anteil der zurückgewonnenen Produkte, die wiederverwendet werden können, sowie Indikatoren für Recycling oder Rückgewinnung. Derzeit konzentrieren sich diese Unternehmen nahezu ausschließlich auf das Recycling und die Rückgewinnung von Materialien aus Produktionsprozessen, trotz des allgemein anerkannten Problems der Plastikverpackungsabfälle und der daraus resultierenden Folgen für die Umwelt. Es wäre wünschenswert, wenn diese Unternehmen der Sammelphase mehr Bedeutung beimessen und hierfür ebenfalls Prozesse und Indikatoren entwickeln würden.

4.4.3 Abschließende Bemerkungen

Die Anwendung des Bewertungsrahmens zur Leistung der Kreislaufwirtschaft bei Unternehmen im Teilsektor Verpackungen und Kunststoffe bestätigt die Relevanz der ausgewählten Indikatoren als Referenzmodell. Der Bewertungsrahmen bietet eine umfassende Diagnose der aktuellen Leistung im Bereich der Kreislaufwirtschaft und identifiziert effektiv die Schlüsselphasen der Wertschöpfungskette sowie Strategien, die gezielt überwacht werden sollten. Darüber hinaus kann der Rahmen als Referenz für neue Indikatoren dienen, die von Unternehmen übernommen werden sollen. Da das Umfeld der Kreislaufwirtschaft oft komplex ist, erleichtert die Organisation nach Wertschöpfungskettenstufen und Strategien den Implementierungsprozess. Als nächste Schritte und Verbesserungen wäre es sinnvoll, die Indikatoren nach Industriarten zu kategorisieren, um ein prägnanteres und klareres Verständnis dafür zu ermöglichen, welche Aspekte von den Unternehmen verstärkt beachtet werden sollten. Eine Einschränkung der vorgeschlagenen Methode betrifft die vergleichsweise geringe Anzahl an Unternehmen, die in der Fallstudie berücksichtigt werden konnten. Eine Anwendung auf eine größere Gruppe von Unternehmen wäre vorteilhaft, um mögliche Einschränkungen oder Verbesserungsmöglichkeiten zu identifizieren. Aus diesem Grund läuft derzeit eine Initiative zur automatischen oder halbautomatischen Extraktion, Klassifizierung und Speicherung von Daten direkt aus Unternehmensberichten. Hierfür wird gegenwärtig ein KI-Tool eingesetzt.



5 Kreislaufwirtschaftsbewertung auf Mesoebene

Aufbauend auf den in Kapitel 2 dargestellten grundlegenden Prinzipien und Strategien der Kreislaufwirtschaft fokussiert sich dieses Kapitel auf die Bewertung zirkulärer Ansätze auf der Mesoebene. In Industrieparks, in denen meist mehrere Unternehmen angesiedelt sind, finden diverse Industrieprozesse konzentriert statt, welche häufig große Optimierungs- und Synergiepotenziale für die Transformation zu einer Kreislaufwirtschaft bieten (World Bank, 2021). Diese Industriellen Symbiosen (IS) können nicht durch die Bewertung auf der Mikroebene erfasst werden, sondern erfordern eine Bewertung auf der Mesoebene. Schließlich operieren Unternehmen i. d. R. nicht isoliert, sondern sind Teil von Lieferketten oder gar Netzwerken und Industrieparks welche ganzheitlich erfasst, bewertet und optimiert werden können, um diese kooperativ kreislauffähiger gestalten zu können (Cagno et al., 2023). Allerdings ist auch die CE-Bewertung auf der Mesoebene ein komplexes Themenfeld, welches verschiedene Zirkularitäts- und Umweltaspekte neben sozialen und ökonomischen Faktoren beinhaltet, welche wiederum die Entscheidungsfindung in verschiedenen Umsetzungsphasen von EIPs (Eco-Industrial Parks) beeinflussen (Corona et al., 2019; UNIDO, 2017).

Ziel dieses Bewertungsrahmens für die Mesoebene ist es einen anwendungsnahen Überblick zu bestehenden Bewertungsansätzen für die Mesoebene zu bieten. Wie diese Übersicht erstellt wurde, ist in Kapitel 5.1 beschrieben. Zudem wird eine kurze Übersicht zur aktuellen Forschungslandschaft gegeben (5.2), welche als Basis für den anschließend vorgestellten Bewertungsrahmen dient.

5.1 Methodisches Vorgehen

Die Entwicklung des Frameworks zur Leistungsmessung der CE auf der Mesoebene folgte einem theorieorientierten Ansatz auf Grundlage einer Literaturübersicht. Anstatt eine vollständige Abdeckung aller verfügbaren Veröffentlichungen anzustreben, konzentrierte sich die Literatursammlung auf einflussreiche Studien, die wesentlich zur Leistungsmessung von EIPs und IS beigetragen haben. Die ausgewählten Publikationen repräsentieren sich ergänzende Perspektiven. Gemeinsam bildeten diese Studien die theoretische Grundlage zur Identifizierung der wichtigsten Bewertungsansätze und der zentralen Bestandteile der Leistungsmessung der CE auf der Mesoebene.

Aufbauend auf dieser Literatur wurde eine konzeptionelle Darstellung von EIPs entwickelt, um diese ergänzenden Perspektiven zu integrieren. Zunächst wurden die wesentlichen Bestandteile von EIPs zusammengeführt, um die in dieser Arbeit verwendeten Systemgrenzen festzulegen. Dieser konzeptionelle Rahmen wurde anschließend durch ein Referenz-Framework operationalisiert, das Leistungsindikatoren entsprechend den Bestandteilen von EIPs und den zugehörigen Aktivitäten der CE strukturiert. Anstatt eine neue Bewertungsmethodik oder ein neues Indikatorensystem vorzuschlagen, fasst das entwickelte Framework die in der Literatur identifizierten Indikatoren in einer strukturierten Form zusammen. Dadurch werden ihre Identifizierung, inhaltliche Einordnung, Auswahl und Anwendung für die Leistungsmessung der CE auf der Mesoebene unterstützt.

5.2 Bestehende Ansätze zur Messung der Kreislaufwirtschaft auf der Mesoebene

Die Literaturrecherche identifizierte verschiedene Ansätze zur Messung der Leistung der Kreislaufwirtschaft auf der Mesoebene. Anstatt ein einheitliches Bewertungsframework zu



verwenden, verfolgen die untersuchten Studien unterschiedliche Bewertungsziele, Umsetzungsphasen und Anforderungen an die Entscheidungsunterstützung.

Agudo et al. (2023) konzentrierten sich auf die Bewertung der Bereitsein vor der Umsetzung von IS. Sie entwickelten eine Checkliste auf der Grundlage von „Exchange Resources“ und „Exchange Capacity“ und zeigten, dass die Bereitsein sowohl von den Austauschmöglichkeiten als auch von unterstützenden organisatorischen Voraussetzungen abhängt. Die Anwendung der Checkliste zeigte Schwächen beim Informationsaustausch, bei der Infrastruktur und bei der institutionellen Unterstützung.

Fraccascia & Giannoccaro (2020) ordneten bestehende Indikatoren in konzeptionelle Taxonomien ein. Sie klassifizierten IS-Indikatoren anhand von drei ergänzenden Fragen: Was soll gemessen werden? Wo soll gemessen werden? und Wie soll gemessen werden? Damit verdeutlichten sie Unterschiede hinsichtlich des Bewertungsziels, des Anwendungsbereichs und des Berechnungsansatzes.

Eine weitere Gruppe von Studien entwickelte standardisierte Indikatorensysteme für EIPs. Geng et al. (2012) identifizierten wichtige Schwächen des nationalen chinesischen Indikatorensystems, darunter das Fehlen sozialer Indikatoren, von Indikatoren zur IS sowie präventionsorientierter Indikatoren. Huang et al. (2019) zeigten, dass der überarbeitete chinesische Standard HJ/T274-2015 bestehende Systeme in einem Set von 32 Indikatoren zusammenführt. Diese sind den Bereichen wirtschaftliche Entwicklung, IS, Ressourcenschonung, Umweltschutz und Informationsbereitstellung zugeordnet. Gleichzeitig wiesen die Autoren auf verbleibende Defizite bei der Messung von Prävention und Quellenreduktion hin.

Die Literaturrecherche identifizierte außerdem strukturierte Leistungsframeworks. Yilmaz et al. (2016) entwickelten ein umfassendes Indikatoren Framework für IS. Es identifiziert, selektiert, klassifiziert und definiert systematisch Umwelt-, Wirtschafts-, Sozial-, Zirkularität- und Netzwerkindikatoren, um die Überwachung, Bewertung und kontinuierliche Verbesserung von Industrial-Symbiosis-Initiativen zu unterstützen. Koch et al. (2022) strukturierten die operative Leistung von EIPs in vier Dimensionen: interne Beziehungen, externe Beziehungen, Energierückgewinnung und Materialrückgewinnung. Kosmol et al. (2021) entwickelten eine sequenzielle Methodik, bei der zunächst qualitative Indikatoren zur Bewertung der technischen Machbarkeit eingesetzt werden. Anschließend folgen quantitative Bewertungen der wirtschaftlichen Tragfähigkeit und der Umweltleistung. Schließlich entwickelte die World Bank (2021) ein internationales Referenzframework, das Governance-, Umwelt-, Sozial- und Wirtschaftsaspekte in einem harmonisierten Bewertungsrahmen integriert.

Insgesamt zeigen die untersuchten Studien, dass die Messung der Leistung der Kreislaufwirtschaft auf der Mesoebene verschiedene sich ergänzende Ansätze umfasst. Dazu gehören Bereitseinsbewertungen, Indikatortaxonomien, standardisierte Indikatorensysteme, hierarchische Leistungsframeworks, sequenzielle Bewertungsmethoden sowie internationale Referenzframeworks. Gemeinsam verdeutlichen diese Ansätze, dass die Leistungsmessung auf der Mesoebene über einzelne Indikatoren hinausgeht und unterschiedliche Bewertungsstrukturen umfasst, die die Umsetzung, das Management und den Vergleich von Leistungen unterstützen.

5.3 Framework zur Leistungsmessung der Kreislaufwirtschaft auf der Mesoebene

Die Entwicklung des Frameworks zur Leistungsmessung der Kreislaufwirtschaft auf der Mesoebene wurde durch die fragmentierte Natur der vorhandenen Literatur motiviert. Anstatt diese bestehenden Beiträge zu ersetzen, integriert das vorgeschlagene Framework ihre



Definition von EIPs integriert werden. Insgesamt zeigen diese Studien, dass kein einzelnes Framework alle in Abbildung 31 dargestellten Bestandteile umfasst. Der in dieser Arbeit vorgeschlagene konzeptionelle Geltungsbereich integriert vielmehr ihre komplementären Beiträge in einer einheitlichen Darstellung, welche die Systemgrenzen für die Organisation von CE-Leistungsindikatoren auf der Mesoebene definiert.

Der konzeptionelle Geltungsbereich wurde durch ein tabellenbasiertes Referenzframework umgesetzt, welches das Hauptergebnis dieser Arbeit darstellt. Anstatt neue Indikatoren vorzuschlagen, konsolidiert das Framework die in der Literatur identifizierten Indikatoren und ordnet sie den in Abbildung 31 dargestellten Bestandteilen von EIPs zu. Dadurch entsteht eine strukturierte Übersicht für die Auswahl und Anwendung von CE-Leistungsindikatoren auf der Mesoebene. Abbildung 32 zeigt die Startseite der Tabellenkalkulation mit einer Beschreibung der Zielstellung, dem methodischen Ansatz und der Dokumentstruktur. Die Tabellenkalkulation ist öffentlich über Zenodo verfügbar (<https://doi.org/10.5281/zenodo.18187483>) und kann für zukünftige Forschungsarbeiten und praktische Anwendungen direkt genutzt und adaptiert werden.

Reference List of Meso-Level Circular Economy Indicators

Project DACE (Data Competency Center for Circular Economy Data)

How to cite this document: Araujo, J., & Viere, T. (2026). Reference List of Meso-Level Circular Economy Indicators [Data set]. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.18187483>.

Created by: Juliano Araujo (conceptualization and execution), Tobias Viere (conceptualization) - Institute for Industrial Ecology, Pforzheim University

Contact: juliano.araujo@hs-pforzheim.de

Date: January, 2026

Purpose of this spreadsheet

The objective of this study is to provide a list of relevant indicators for measuring the performance of Eco-Industrial Parks (meso-level) across their constituent parts, considering different production stages, from by-product sharing to services sharing

Content

[Meso Level Indicators \(compact list\)](#)

[Meso Level Indicators \(full list\)](#)

[Representation of CE indicators by Eco-Industrial Parks stages](#)

Methodology

The Scopus and Google Scholar databases were used for the literature review on performance measurement in Eco-Industrial Parks. Although the literature review was not exhaustive, approximately 50 scientific articles on the topic were consulted to arrive at a smaller list of key references. Subsequently, a generic representation of the production model of Eco-Industrial Parks was constructed, including its crucial processing stages and important indicators, based on the authors' interpretation and perspective

Acknowledgments

This work is part of DACE and receives funding by the German Federal Ministry of Education and Research and the European Union (NextGenerationEU), BMBF Fkz. 16DK22056C

References

Agudo, F. L., Bezerra, B. S., Paes, L. A. B., & Gobbo Júnior, J. A. (2022). Proposal of an assessment tool to diagnose industrial symbiosis readiness. *Sustainable Production and Consumption*, 30, 916–929. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2022.01.013>

Fraccascia, L., & Giannocaro, I. (2020). What, where, and how measuring industrial symbiosis is: A reasoned taxonomy of relevant indicators. *Resources, Conservation and Recycling*, 157. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104799>

Geng, Y., Fu, J., Sarkis, J., & Xue, B. (2012). Towards a national circular economy indicators system in China: An evaluation and critical analysis. *Journal of Cleaner Production*, 23(1), 216–224. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.07.005>

Heshmati, A. (2017). A review of the circular economy and its implementation. *International Journal of Green Economics*, 11(3–4), 251–288. <https://doi.org/10.1504/IJGE.2017.089856>

Huang, B., Yong, G., Zhao, J., Domenech, T., Liu, Z., Chiu, S. F., McDowall, W., Bleichwitz, R., Liu, J., & Yao, Y. (2019). Review of the development of China's Eco-Industrial Park standard system. *Resources, Conservation and Recycling*, 140, 137–144. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.09.013>

Koch, C. M., Tomasín, L., Lolli, F., Buturi, M. A., & Sellitto, M. A. (2022). Performance Assessment of an Eco-Industrial Park: a Strategic Tool to Help Recovering Energy and Industrial Waste. *Chemical Engineering Transactions*, 91, 481–486. <https://doi.org/10.3303/CE12291081>

Kosmol, L., Meiwald, M., Pieper, C., Plötz, J., & Schmidt, T. (2021). An indicator-based method supporting assessment and decision-making of potential by-product exchanges in industrial symbiosis. *Journal of Cleaner Production*, 289. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125593>

World Bank. (2021). *International Framework for Eco-Industrial Parks v.2*.

Yazici, E., Alakag, H. M., & Eren, T. (2023). Prioritizing of sectors for establishing a sustainable industrial symbiosis network with Pythagorean fuzzy AHP: Pythagorean fuzzy TOPSIS method: a case of industrial park in Ankara. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(31), 77875–77889. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-27882-6>

Yilmaz, O., Yontem, E., & Akaya, E. (2016). Industrial Symbiosis Indicators.

Abbildung 32: Referenzrahmen für Indikatoren der Leistungsmessung der Kreislaufwirtschaft auf der Mesoebene

Die kompakte Version des Frameworks (Abbildung 33) bietet eine vereinfachte Benutzeroberfläche für die Auswahl von Indikatoren. Die Tabellenkalkulation fasst 272 Leistungsmetriken aus der ausgewerteten Literatur in einer durchsuchbaren Datenbank zusammen. Mithilfe interaktiver Filter können Anwender Indikatoren entsprechend ihren



spezifischen Bewertungsanforderungen auswählen, ohne statische Indikatorenlisten durchsuchen zu müssen.

Das Framework kann gleichzeitig nach zwei komplementären Dimensionen gefiltert werden. Die erste Dimension entspricht den Bestandteilen bzw. Phasen eines EIPs. Dazu gehören EIP-Design, Ressourceneingänge, Unternehmen, Nebenproduktströme, gemeinsame Dienstleistungen, EIP-Management, IS-Netzwerke, Sammlung und Ressourcenausgänge. Die zweite Dimension umfasst die zugehörigen CE-Strategien. Nach Auswahl der Filter zeigt die Tabellenkalkulation automatisch die relevanten Indikatoren, Metriken und Literaturquellen an.

Eine wichtige Eigenschaft des Frameworks ist seine Flexibilität. Da die Indikatoren systematisch über mehrere Dimensionen klassifiziert werden und nicht als isolierte Listen vorliegen, unterstützt die Datenbank unterschiedliche Analyseformen, ohne dass die Literatur manuell ausgewertet werden muss. Anwender können individuelle Indikatorensätze für bestimmte EIP-Phasen erstellen, die Verfügbarkeit von Indikatoren zwischen verschiedenen CE-Strategien vergleichen, Messlücken identifizieren und die Datenbank als Ausgangspunkt für die Entwicklung von Systemen zur Leistungsbewertung nutzen. Damit dient das Framework sowohl als Referenzwerk als auch als praktisches Werkzeug für Forschung und Anwendung der CE-Leistungsmessung auf der Mesoebene.

Reference List of Meso Level CE Indicators (compact list)

Select the filters of interest to obtain the corresponding indicators. It is possible to use multiple filters simultaneously

EIP stages

- 1. EIP: design
- 2. Resource inflows
- 3. EIP: company
- 4. EIP: by-product
- 5. EIP: shared services
- 6. EIP: management
- 7. EIP: network
- 8. Collection
- 9. Resource outflows

R strategies

- 0. Refuse
- 1. Rethink
- 2. Reduce
- 3. Reuse
- 8. Recycling

Number of metrics: **272**

EIP stages	R strategies	Indicator	Metric	Source
1. EIP: design	1. Rethink	Circular practice adoption	Proportion of manufacturing firms adopting circular economy practices, including engagi	World Bank, 2021
1. EIP: design	1. Rethink	EIP economic feasibility	The cash flow generated by the investment in industrial symbiosis	Fraccascia et al., 2020
1. EIP: design	1. Rethink	EIP economic feasibility	Completion of market/feasibility study & business plan for green infrastructure/services i	World Bank, 2021
1. EIP: design	1. Rethink	EIP economic feasibility	Park management is financially solvent to operate/provide park infrastructure and servic	World Bank, 2021
1. EIP: design	1. Rethink	EIP economic feasibility	The park management should be economically viable in terms of contributing to jobs, te	World Bank, 2021
1. EIP: design	1. Rethink	EIP economic feasibility	Park management entity is responsible for marketing the park and park concepts (EIP c	World Bank, 2021
1. EIP: design	1. Rethink	EIP economic feasibility	The park management should render its services at realistic costs to cover operational c	World Bank, 2021
1. EIP: design	1. Rethink	EIP economic feasibility	Capacity of environmental policies and regulations to encourage industrial symbiosis	Morales et al., 2019 ; Shi, Li, 2019 ; Song
1. EIP: design	1. Rethink	EIP economic feasibility	Ability to access sources of finance to make investments to implement IS	Baldassarre et al., 2019 ; Heeres, Verme
1. EIP: design	1. Rethink	EIP economic feasibility	Ability to access to funding sources to transform the current production process into a c	Baldassarre et al., 2019 ; Heeres, Verme
1. EIP: design	1. Rethink	EIP economic feasibility	% of space rented or used by resident firms compared to the total amount of available s	World Bank, 2021
1. EIP: design	1. Rethink	EIP economic feasibility	Total net present value of the industrial symbiosis applications investment	Ozge et al. 2016
1. EIP: design	1. Rethink	EIP economic feasibility	Return on industrial symbiosis applications investment	Ozge et al. 2016
1. EIP: design	1. Rethink	EIP economic feasibility	Internal rate of return on industrial symbiosis applications investment	Ozge et al. 2016
1. EIP: design	1. Rethink	EIP economic feasibility	Ability to have access to subsidies for the formation of exchange networks	Chertow, 2007 ; Shi, Chertow, Song, 201
1. EIP: design	1. Rethink	EIP economic feasibility	Total turnover	Ozge et al. 2016
1. EIP: design	1. Rethink	EIP economic feasibility	Change in total turnover	Ozge et al. 2016
1. EIP: design	1. Rethink	EIP economic feasibility	Relative change in total turnover	Ozge et al. 2016

Navigation: Introduction | **Compact list** | Full list | CE indicators by EIP stages

Abbildung 33: Kompakte Ansicht der Referenzliste für Indikatoren der Leistungsmessung der Kreislaufwirtschaft auf der Mesoebene

Während die kompakte Benutzeroberfläche in Abbildung 33 eine schnelle Suche und Auswahl von Indikatoren ermöglicht, stellt die vollständige Version in Abbildung 34 die gesamte Referenzdatenbank des Frameworks bereit. Jeder Datensatz enthält die zugehörige EIP-Phase, die CE-Strategie, den Indikator, die Metrik, die Maßeinheit, die Literaturquelle sowie ergänzende Anmerkungen. Diese vollständige Dokumentation bewahrt die ursprünglich aus der Literatur extrahierten Informationen und gewährleistet gleichzeitig die vollständige Rückverfolgbarkeit jeder Leistungsmetrik.

Die vollständige Datenbank ermöglicht außerdem detailliertere Analysen als die kompakte Benutzeroberfläche. Anwender können Messansätze zwischen verschiedenen Studien



vergleichen, alternative Metriken für denselben Indikator untersuchen und die dokumentierten Informationen bei der Entwicklung oder Anpassung von Systemen zur CE-Leistungsmessung auf der Mesoebene wiederverwenden.

Reference List of Meso Level CE Indicators (full list)				Note: Reference list of indicators and their respective metrics for the meso level of the Circular Economy. The list has been drawn from relevant scientific and academic sources, although it is not exhaustive.				FACE	
EIP stages data		R' strategy data		Indicator and metric data				Other	
N	EIP stages	I	R' strategy	Indicator	Metric	Unit	Source	Observation	
1	EIP design	1	Rethink	Circular practice adoption	Proportion of manufacturing firms adopting circular economy practices, including engage	%	World Bank, 2021		
1	EIP design	1	Rethink	EIP economic feasibility	The cash flow generated by the investment in industrial symbiosis		Fraccascia et al., 2020		
1	EIP design	1	Rethink	EIP economic feasibility	Completion of market/feasibility study & business plan for green infrastructure/services	Yes/No	World Bank, 2021		
1	EIP design	1	Rethink	EIP economic feasibility	Park management is financially solvent to operate/provide park infrastructure and service	Yes/No	World Bank, 2021		
1	EIP design	1	Rethink	EIP economic feasibility	The park management should be economically viable in terms of contributing to jobs, loc	Yes/No	World Bank, 2021		
1	EIP design	1	Rethink	EIP economic feasibility	Park management entity is responsible for marketing the park and park concepts	EIP c/Yes/No	World Bank, 2021		
1	EIP design	1	Rethink	EIP economic feasibility	The park management should render its services at realistic costs to cover operational c	Yes/No	World Bank, 2021		
1	EIP design	1	Rethink	EIP economic feasibility	Capacity of environmental policies and regulations to encourage industrial symbiosis	High, Medium, Low	Morales et al., 2019; Shi, Li, 2019; Song et al., 2018; Tao et al., 2019;		
1	EIP design	1	Rethink	EIP economic feasibility	Ability to access sources of finance to make investments to implement IS	High, Medium, Low	Baldassare et al., 2019; Heeres, Vermeulen, De Walle, 2004, as cited i		
1	EIP design	1	Rethink	EIP economic feasibility	Ability to access to funding sources to transform the current production process into a c	High, Medium, Low	Baldassare et al., 2019; Heeres, Vermeulen, De Walle, 2004, as cited i		
1	EIP design	1	Rethink	EIP economic feasibility	% of space rented or used by resident firms compared to the total amount of available s	%	World Bank, 2021		
1	EIP design	1	Rethink	EIP economic feasibility	Total net present value of the industrial symbiosis applications investment	\$	Ozge et al., 2016		
1	EIP design	1	Rethink	EIP economic feasibility	Return on industrial symbiosis applications investment	Time	Ozge et al., 2016		
1	EIP design	1	Rethink	EIP economic feasibility	Internal rate of return on industrial symbiosis applications investment	%	Ozge et al., 2016		
1	EIP design	1	Rethink	EIP economic feasibility	Ability to have access to subsidies for the formation of exchange networks	High, Medium, Low	Chertow, 2007; Shi, Chertow; Song, 2010, as cited in Agudo et al., 2022		
1	EIP design	1	Rethink	EIP economic feasibility	Total turnover	\$	Ozge et al., 2016		
1	EIP design	1	Rethink	EIP economic feasibility	Change in total turnover	\$	Ozge et al., 2016		
1	EIP design	1	Rethink	EIP economic feasibility	Relative change in total turnover	%	Ozge et al., 2016		
1	EIP design	1	Rethink	EIP energy management	Number of firms covered by an energy management system in the ecoindustrial park	Count of firms	World Bank, 2021		
1	EIP design	1	Rethink	EIP energy management	Proportion of the park facilities that have a metering system in place	%	World Bank, 2021		
1	EIP design	1	Rethink	EIP energy management	Proportion of the tenant firms that have a metering system in place	%	World Bank, 2021		
1	EIP design	1	Rethink	EIP energy management	Total CO2 emissions covered by the firms with energy management certification	tCO2e	World Bank, 2021		
1	EIP design	1	Rethink	EIP impact	Eco-efficiency (Eco-efficiency = Economic Value / Environmental Impact)		Fraccascia et al., 2020		Hybrid indicators (economic, environ
1	EIP design	1	Rethink	EIP impact	Environmental cost effectiveness (Annual CO2 emission savings) / (Annual cost of indus	\$	Batana, Vriens, & Slee, 2010, as cited in Ozge et al., 2016		
1	EIP design	1	Rethink	EIP impact	Proportion of open space in the park for native flora and fauna	Area	World Bank, 2021		
1	EIP design	1	Rethink	EIP impact	Abiotic resource depletion		Ozge et al., 2016		
1	EIP design	1	Rethink	EIP impact	Water distribution (water footprint)		Ozge et al., 2016		

Abbildung 34: Vollständige Datenbank der Indikatoren der Leistungsmessung der Kreislaufwirtschaft auf der Mesoebene

Das Framework verdeutlicht außerdem den mehrdimensionalen Charakter der CE-Leistungsmessung auf der Mesoebene. Anstatt sich ausschließlich auf Materialaustausch zu konzentrieren, decken die identifizierten Indikatoren organisatorische, wirtschaftliche, ökologische und operative Aspekte ab, die sich auf verschiedene Bestandteile von EIPs verteilen. Beispiele sind Indikatoren zur Umsetzung zirkulärer Praktiken, zur wirtschaftlichen Machbarkeit, zum Energiemanagement, zu Umweltauswirkungen, zur Ressourceneffizienz, zur Ressourcenrückgewinnung, zur Infrastruktur, zu Managementpraktiken sowie zur Umsetzung von IS.

Ein weiterer Beitrag des Frameworks besteht in der eindeutigen Zuordnung jeder Leistungsmetrik sowohl zu einer EIP-Phase als auch zu einer CE-Strategie. Diese mehrdimensionale Klassifikation ermöglicht es, die Literatur sowohl aus einer strukturellen als auch aus einer strategischen Perspektive zu analysieren, individuelle Indikatorensets zusammenzustellen, Messansätze zwischen verschiedenen CE-Strategien zu vergleichen und Messlücken zu identifizieren. Dadurch dient das Framework nicht nur als Referenzdatenbank, sondern auch als praktisches Analysewerkzeug für zukünftige Bewertungen der CE-Leistung auf der Mesoebene.



6 Kreislaufwirtschaftsbewertung auf Makroebene

Dieses Kapitel befasst sich mit dem Stand der Bewertung von Kreislaufwirtschaft auf der Makroebene. Unter der Makroebene wird im Folgenden die nationale Ebene verstanden. Im Gegensatz zur Mikroebene gibt es bereits eine langjährige Forschung und Datenentwicklung, einschließlich internationaler Harmonisierungen, sodass der Stand des aktuellen Bewertungsrahmens ausführlicher dargestellt wird.

Da ein Bewertungsrahmen stets für ein Thema bzw. eine Entwicklung, die es zu beobachten und zu bewerten gilt, geschaffen wird, wird zunächst die Entwicklung und zunehmende Ausdifferenzierung der Kreislaufwirtschaft skizziert (Kap.5.1). Darauf aufbauend werden der aktuelle Bewertungsrahmen sowie potenzielle Weiterentwicklungen sowohl für Deutschland als auch für die EU aufgezeigt (5.2). Grundlegend sind dabei die sogenannten Konten, die im Rahmen der Umweltökonomischen Gesamtrechnungen erhoben werden (Kap. 5.2.1) und darüberhinausgehende Indikatoren, die auf Länderebene (Deutschland, Kap. 5.2.2) bzw. auf Ebene der EU (Kap. 5.2.3) weiterentwickelt und genutzt werden. Die R-Strategien werden hierfür als Analyseraster genutzt. Es wird dabei dargelegt, dass für die Bewertung der niederen R-Strategien (insb. Recycling) inzwischen verschiedene Indikatoren vorliegen, für die Bewertung der höheren R-Strategien sind jedoch noch viele Lücken zu konstatieren. Die abschließenden Empfehlungen konkretisieren den Weiterentwicklungsbedarf (Kap. 5.3).

6.1 Entwicklung der Kreislaufwirtschaft

6.1.1 Gesetzliche Grundlagen

Der traditionelle deutsche Kreislaufwirtschaftsbegriff resultiert aus einer Weiterentwicklung der Abfallwirtschaft. Die Abfallwirtschaft adressierte den Umgang mit Materialien nach der Nutzung. Steigende Abfallmengen, begrenzter Platz für zusätzliche Deponien, Akzeptanzprobleme bei Müllverbrennungsanlagen und die zunehmende Erkenntnis, dass Abfälle auch werthaltige Rohstoffe enthalten, führte zur Weiterentwicklung des 1972 erlassenen Abfallbeseitigungsgesetzes hin zum Kreislaufwirtschafts-/Abfallbeseitigungsgesetz von 1996 (KrW-/AbfG). Der zentrale Grundgedanke war das Schließen von Stoffkreisläufen (KrWG, 2012).

In dem damaligen Kreislaufwirtschafts-/Abfallbeseitigungsgesetz wurde erstmalig eine Abfallhierarchie eingeführt, das heißt eine Priorisierung des Umgangs mit Abfallstoffen. Die Abfallhierarchie definierte, dass Vermeidung von Abfällen einem Recycling bzw. einer energetischen Nutzung vorzuziehen sei und das Recycling wiederum der Deponierung vorzuziehen sei. Eine umfassende Novellierung des Kreislaufwirtschaftsgesetzes fand 2012 und erneut 2020 statt. Das Kreislaufwirtschaftsgesetz ist das Herzstück des deutschen Abfallrechts, das durch weitere Bundesgesetze, wie bspw. das Abfallverbringungsgesetz oder das Verpackungsgesetz, und Bundesverordnungen, darunter die Abfallverzeichnisverordnung oder die Gewerbeabfallverordnung, ergänzt wird. Wie auch andere Umweltgesetze ist das KrWG in einem europäischen Rechtsrahmen eingebunden. Maßgeblich ist die Abfallrichtlinie (Directive 2008/98/EC), die 2008 verabschiedet und seitdem mehrfach novelliert wurde.

Sowohl die Definition von Abfällen als auch die Abfallhierarchie wurde mit den Novellierungen der Abfallrichtlinie und des KrWG weiterentwickelt. Dies betraf unter anderem den



Anwendungsbereich (was ist Abfall) und Pflichten zum Umgang mit Abfällen (Andienungs- und Überlassungspflichten). Für die Bewertung von Kreislaufwirtschaft sind folgende Weiterentwicklungen besonders relevant:

- Die Abfallhierarchie wurde auf fünf Stufen ausgeweitet: So ist weiterhin die Vermeidung prioritär, gefolgt von der Vorbereitung zur Wiederverwendung. An dritter Stelle steht das Recycling, an vierter Stelle die sonstige Verwertung einschl. der energetischen Verwertung und Verfüllung und an letzter Stelle steht weiterhin die Beseitigung (§6 KrWG). Grundsätzlich gilt, dass die stoffliche Verwertung vor der energetischen Verwertung vorgezogen werden soll. Ausnahmen müssen begründet werden, bspw. mit Lebenszyklusbetrachtungen. Grundsätzlich ist eine hochwertige Verwertung anzustreben (§8 KrWG).
- Um die stoffliche Verwertung zu erleichtern, sind Getrennthaltungsgebote und Vermischungsverbote für eine Vielzahl von Abfällen festgelegt (§9 KrWG)
- Neu ist die Kategorie „Nebenprodukte“ in der Produktion, Nebenprodukte sind damit kein Abfall (§4 KrWG).
- Die Abfallende-Eigenschaft wurden dahingehend überarbeitet, dass nicht erst die Deponierung das Abfallende darstellt, sondern die Erfüllung bestimmter Kriterien, die im §5 KrWG festgelegt sind.

Darüber hinaus wurden Getrennthaltungspflichten sowie Recyclingquoten für ausgewählte Materialgruppen eingeführt bzw. aktualisiert und Vermischungsverbote verschärft. Die Produktverantwortung wurde weitreichend verändert, das Abfallrecht wurde mit dem Chemikalien- und Produktrecht stärker harmonisiert.

Mit dem Kreislaufwirtschaftsgesetz bzw. den Novellierungen wurde der Fokus von der Abfallwirtschaft stärker auf den Umgang mit Stoffströmen gelegt. Kreislaufwirtschaft bedeutet heute nicht nur das Schließen von Stoffkreisläufen, sondern die Materialien möglichst lange in der Nutzung zu halten. Zusätzliche Gesetze und Verordnungen zu einzelnen Produktgruppen bzw. Stoffen unterstreichen diesen Perspektivwechsel. Der Begriff der Kreislaufwirtschaft nähert sich damit dem der „Circular Economy“ an bzw. wird mit diesem synonym.

Auf der Basis der Kreislaufwirtschaftsgesetze wurden Indikatoren und Datensysteme zur Abfallwirtschaft entwickelt. Die Daten werden auf kommunaler bzw. Kreisebene erhoben und von den statistischen Landesämtern zusammengeführt. Destatis führt die Abfalldaten der Länder für Deutschland insgesamt alle zwei Jahre zusammen. Die Abfallstatistiken beinhalten Abfallmengen nach Abfallfraktionen und die Behandlung der Abfälle. Mit der Weiterentwicklung der Abfallwirtschaft zur Kreislaufwirtschaft wurden sowohl die Abfallerzeuger und deren Abfallfraktionen stärker separiert als auch die Behandlung der Abfälle. Dies spiegelt sich in den statistischen Erhebungen wider. Inzwischen werden rezyklierbare Fraktionen wie Glas, Papier/Pappe/Kartonagen, Wertstoffe/Verpackungen, Elektroaltgeräte und sonstiges (Verbunde, Metalle, Textilien) als Teilmenge der Siedlungsabfälle auch in den bundesweiten Abfallbilanzen ausgewiesen; der Abfallschlüssel geht weit darüber hinaus und differenziert detailliert viele Material- und Produktgruppen (Statistisches Bundesamt, 2025e).

Nicht hinreichend abgedeckt ist die Differenzierung nach der Qualität der Abfälle. Zwar werden gefährliche und nicht gefährliche Abfälle unterschieden, jedoch ist die Schadstoffbelastung, die im Allgemeinen auch nicht gefährliche Abfälle aufweisen, nur hinsichtlich weniger Abfallfraktionen weiter differenziert. Ein Beispiel ist Altholz, das in verschiedene Schadstoffklassen unterteilt ist, woraus sich die weitere Verwendung bzw. Behandlung ableitet.



Weiterhin deckt die Abfallstatistiken keine spezifischen Rohstoffgehalte in Produkten bzw. Produktgruppen ab. Dies ist besonders relevant für Abfälle, in denen kritische bzw. strategische Rohstoffen enthalten sind. Bislang sind die Bestrebungen, die Sicherheit der Rohstoffversorgung zu verbessern, und die Abfallwirtschaft nicht aufeinander abgestimmt. Zwar soll nach dem Critical Raw Material Act der EU ein Teil der Versorgung durch das Recycling zukünftig gedeckt werden, jedoch geben die Informationen, die gegenwärtig im Rahmen der Abfallwirtschaft erhoben werden, keine hinreichenden Anhaltspunkte. Empfehlenswert ist daher eine Weiterentwicklung der Abfallstatistiken, damit die erforderlichen Informationen zeitnah vorliegen. Inwieweit aktuelle Ansätze wie bspw. digitale Produktpässe hier eine pragmatische und hinreichende Lösung bieten, bleibt abzuwarten.

Grundsätzlich deckt die Abfallstatistik Abfälle ab, die über den Abfallsektor entsorgt werden. Damit sind die Abfallbilanzen grundsätzlich gut geeignet, R-Strategien wie das Recycling zu monitoren unter der Berücksichtigung, dass closed loops oder bspw. industrielle Symbiosen nicht inkludiert sind. Weitere R-Strategien wie Suffizienz können nur eingeschränkt, d.h. annahmebasiert und indirekt über Veränderungen der Abfallmengen, erschlossen werden. Der Großteil der R-Strategien (Remanufacturing, Repair, Effizienz, Sharing, etc.) können nicht über die Abfallstatistiken gemonitort werden.

6.1.2 Die Nationale Kreislaufwirtschaftsstrategie (NKWS)

Die Nationale Kreislaufwirtschaftsstrategie (NKWS) ist aktuell die zentrale Strategie Deutschlands im Bereich CE. Die NKWS wurde am 04.12.2024 vom Kabinett verabschiedet. Die Erarbeitung beruhte auf einem breit angelegten Partizipationsprozess wichtiger Stakeholder. Die gesamte NKWS umfasst 140 Seiten, aus denen im Folgenden wesentliche Eckpunkte für den makroökonomischen Bewertungsrahmen dargestellt werden (Bundesumweltministeriums, 2025).

Ziel der NKWS ist es, einen Beitrag zur Klimaneutralität, Wettbewerbsfähigkeit und wirtschaftlichen Widerstandsfähigkeit bis 2045 sowie zur Zielerreichung der Nachhaltigkeitsstrategie zu leisten. Hierfür verfolgt sie das Leitbild der Senkung des Primärrohstoffverbrauchs (RMC) und orientiert sich dabei an dem langfristigen Ziel von 6-8 Tonnen pro Person. Der in der NKWS genannte aktuelle RMC liegt bei 15,3 Tonnen pro Person. Drei Ziele werden konkret genannt:

Ziel 1: Stoffkreisläufe schließen.

Dieses Ziel wird über die Circular Material Use Rate (CMUR) gemessen. Angestrebt ist, in Anlehnung an die Ziele der Europäischen Union, eine Verdopplung der CMUR bis 2030. Die in der NKWS genannte CMUR liegt bei 13 %.

Ziel 2: Rohstoffversorgungssicherheit und Rohstoffsoveränität erhöhen.

Mit diesem Ziel unterstützt die NKWS die Ziele des Critical Raw Materials Acts (CRMA) der Europäischen Union, die Versorgungssicherheit mit strategischen Rohstoffen zu verbessern. So sollen die Produktionskapazitäten (10 % der Entnahme und 40 % der Weiterverarbeitung sollen in der EU stattfinden) und die Recyclingkapazitäten (25 % des Bedarfes) erhöht werden, zudem soll kein strategischer Rohstoff zu mehr als 65 % aus einem einzigen Drittland bezogen werden.



Ziel 3: Abfälle vermeiden.

Dieses Ziel adressiert die Siedlungsabfälle, die bis 2030 um 10 % und bis 2045 um 20 % im Vergleich zu 2020 sinken sollen. Im Jahr 2020 lagen die Siedlungsabfälle bei 613 kg pro Person. Ferner sollen die Auswirkungen der Kreislaufwirtschaft auf Umwelt, Klima, Wirtschaft und Gesellschaft gemonitort werden. Im Einzelnen sind formuliert:

- Auswirkungen der NKWS auf die (Einsparung von) Treibhausgasemissionen.
- Auswirkungen der NKWS auf (den Erhalt von) Biodiversität.
- Globale Auswirkungen der NKWS über einen veränderten Konsum.
- Innovationen im Bereich Kreislaufwirtschaft
- Beschäftigung im Bereich Kreislaufwirtschaft
- Veränderung der Gesamtrohstoffproduktivität

6.1.2.1 Exkurs: Querschnittsthemen

In der NKWS werden elf Querschnittsthemen aufgeführt. Diese werden der Vollständigkeit halber im Folgenden mit Blick auf die genannten Ziele kurz skizziert. Ein Monitoringrahmen wird aktuell entwickelt, dem kann hier nicht vorgegriffen werden.

R-Strategien: Die NKWS orientiert sich an der 10-stufigen R-Leiter, die Refuse, Rethink, Reduce, Reuse, Repair, Refurbish, Remanufacture, Repurpose, Recycle und Recover umfasst. Mit diesen zehn Rs soll die Wirtschaft grundsätzlich neuausgerichtet werden, von einer linearen zu einer zirkulären Wirtschaft.

Das Querschnittsthema **Produktgestaltung für Zirkularität und Langlebigkeit** verfolgt die Ziele a) ambitionierte rechtliche Mindestanforderungen auf EU-Ebene (u.a. gemessen an einer Erhöhung der Materialeffizienz bis 2030), b) Verbesserung der Rahmenbedingungen für kreislauffähige Produkte und Geschäftsmodelle, c) Orientierung für Hersteller durch die Definition freiwilliger ökologischer Produktstandards.

Das Querschnittsthema **Nachhaltiger Konsum und Handel** hat die Ziele a) die konsumbezogenen Treibhausgasemissionen, die aktuell bei 10,35 Tonnen pro Person liegen, bis 2030 gegenüber 2010 um mindestens 50 % zu mindern; b) den Rohstoffeinsatz für den Konsum privater Haushalte bis 2030 gegenüber 2010 zu mindern; c) den Marktanteil umweltfreundlicher Produkte mit glaubwürdigem Umweltsiegel bis 2030 auf mindestens 34 % zu steigern (2022 lag der Anteil bei 13,9 %) und d) Reparaturbetriebe zu stärken mit einer Erhöhung der Anzahl der Beschäftigten und des Umsatzes.

Das Querschnittsthema **Normung** unterstützt die Normungsroadmap CIRCULAR ECONOMY und beinhaltet, dass die Arbeit europäisch und international gedacht wird, um Handelshemmnisse zu verhindern. Mit dem Querschnittsthema **Ökonomische Instrumente und Finanzierung** soll marktkonform die Transformation zu einer zirkulären Wirtschaft angereizt werden. Grundsätze hierfür sind, a) dass die Preise mehr als bisher die externen Effekte abbilden, b) dass die Anreize den globalen Wettbewerb berücksichtigen, c) dass die Instrumente sinnvoll aufeinander abgestimmt werden, und d) dass Zirkularität als Kriterium in Förderprogrammen aufgenommen wird. Das Querschnittsthema **Schadstoffausschleusung** lehnt sich an den Green Deal und dem Ziel Stärkung des Kreislaufprinzips in einer schadstofffreien Umwelt an.

Das Querschnittsthema **Zirkuläre Bioökonomie und biogene Rohstoffe** zielt darauf ab, a) dass biogene und biotechnologisch nutzbare Rohstoffe möglichst lange im Kreislauf geführt und in



Nutzungskaskaden wiederverwendet werden, b) Produkte und Verfahren aus der industriellen Bioökonomie gezielt zu fördern, c) eine leichte Reparierbarkeit und Rezyklierbarkeit bei der Produktentwicklung zu beachten und d) die Potenziale biogener Reststoffe optimal zu nutzen. Das Querschnittsthema **Globale Stoffströme** verfolgt die Ziele a) die Ziele des CRMA zu unterstützen, b) Kapazitäten in Partnerländer zur Gewinnung von Sekundärrohstoffen zu stärken, c) Partnerländer bei Aufbau von wirtschafts- und industriepolitischen Kapazitäten im Bereich Kreislaufwirtschaft und nachhaltige Wertschöpfungs- und Lieferketten zu unterstützen und d) relevante Datenlücken zu kritischen Rohstoffen bis 2030 zu schließen.

Forschung und Entwicklung soll a) Forschung und Innovation ressortübergreifend voranbringen, b) Transfer und schnelle Skalierung von F&E-Ergebnisse fördern und c) den Transfer in Bildungs- und Weiterbildungsangebote fördern.

Qualifizierung zielt darauf, a) Ausbildungsstrukturen und -inhalte an die geänderten Anforderungen anzupassen, b) relevante Akteur*innen in der Bildungslandschaft zu vernetzen, c) Qualifizierungs-, ergänzende Ausbildungs-, Weiterbildungs- und Beratungsangebote auszubauen und zu verstetigen sowie c) Schulungs- und Informationsangebote in der Erwachsenenbildung zu entwickeln und zu verstetigen.

Abfälle vermeiden und verwerten beinhaltet die Weiterentwicklung des Kreislaufwirtschaftsrechts.

6.1.2.2 Handlungsfelder, Fokus: Kunststoffe

In der NKWS sind zehn Handlungsfelder definiert, die mit einem Überblick zum Status Quo, mit Verweisen auf laufende Prozesse und Vorhaben sowie mit Zielen, (teilweise mit) Indikatoren und Maßnahmen beschrieben werden. Die Handlungsfelder beziehen sich auf Produkt- oder Abfallströme bzw. auf Sektoren. Im Folgenden wird ausschließlich das Handlungsfeld Kunststoffe skizziert.

Im Handlungsfeld Kunststoffe sind folgende Ziele genannt:

- Schrittweise Erhöhung des Rezyklatanteils aus Endverbraucherabfällen, kombiniert mit einer Steigerung der Sortier- und Recyclingkapazität.
- Steigerung des Rezyklateinsatzes bei der Herstellung von Kunststoffen.

Zur Erreichung der Ziele sind folgende Maßnahmen aufgeführt: Unterstützung eines Dialoges zur Materialvielfalt bei Kunststoffen; Stärkung des Rezyklatanteils bei Kunststoffen (bspw. Über produktbezogene Mindestrezyklatanteile oder der Einführung einer Einspeisevergütung); Abbau von Hemmnissen für den Rezyklateinsatz durch Normung; Optimierte Recycling und Forschung.

Ein Bewertungsrahmen für die Erreichung der Ziele liegt noch nicht vor, wird jedoch gegenwärtig entwickelt. Wichtig für den Bewertungsrahmen sind folgende Aspekte:

- Conversio erhebt alle zwei Jahre Daten zur Kunststoffproduktion und -nutzung. Diese Daten enthalten auch Rezyklate. Eine Kurzfassung wird öffentlich zur Verfügung gestellt, der ausführliche Bericht kann käuflich erworben werden. Auf diese Daten greifen auch Behörden und Ministerien zurück, wenn sie Kunststoffflüsse einordnen. Aus den Daten lassen sich gängige Indikatoren wie bspw. die Rezyklatquote ableiten.
- Kunststoffe sind aus gesamtwirtschaftlicher Perspektive ein Zwischenprodukt bzw. eine Gruppe ähnlicher Zwischenprodukte, sie werden in der UGR nicht separat ausgewiesen.



Ferner ist ihre Verwendung sehr heterogen. Verknüpfungen der sektoralen Daten von Convesio und der gesamtwirtschaftlichen Daten aus der UGR stellen daher eine Herausforderung dar.

- Eine weitere Herausforderung ist die konkrete Zusammensetzung der Kunststoffanteile in Produkten, die oftmals aus Verbundmaterialien bestehen, einschließlich der Gehalte an Zusatzstoffen bzw. Stör- oder Schadstoffen für ein Recycling.

6.2 Bewertungsrahmen

6.2.1 Grundlagen für den Bewertungsrahmen: Die Umweltökonomischen Gesamtrechnungen

Ein zentrales Ziel der Kreislaufwirtschaft ist die Schließung von Stoffkreisläufen und die möglichst lange Nutzung von Rohstoffen in Form von Produkten bzw. Gütern. Daher ist die Kenntnis über die realen Stoffkreisläufe einer der zentralen und grundlegenden Bausteine im Bewertungsrahmen einer CE.

Die Informationen zu gesamtwirtschaftlichen Stoffkreisläufen werden im Rahmen der Umweltökonomischen Gesamtrechnungen (UGR) gesammelt und aufbereitet. Die UGR entspricht dem System of Environmental Economic Accounting (SEEA), ein international harmonisiertes Rahmenwerk, das fortlaufend weiterentwickelt wird (United Nations, 2025). Zuständig ist das statistische Bundesamt. Die gesetzliche Grundlage ist die Verordnung (EU) Nr. 538/2014 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 16. April 2014 zur Änderung der Verordnung (EU) Nr. 691/2011 über europäische umweltökonomische Gesamtrechnungen.

Im Rahmen der UGR werden die Wechselwirkungen zwischen Umwelt und Wirtschaft auf der Basis international harmonisierter einheitlicher Konzepte, Definitionen und Klassifikationen erhoben. Die UGR steht komplementär zu den Volkswirtschaftlichen Gesamtrechnungen (VGR) und ist mit diesen weitmöglich kompatibel. Die folgende Abbildung zeigt den Aufbau der UGR. (Statistisches Bundesamt, 2025d)

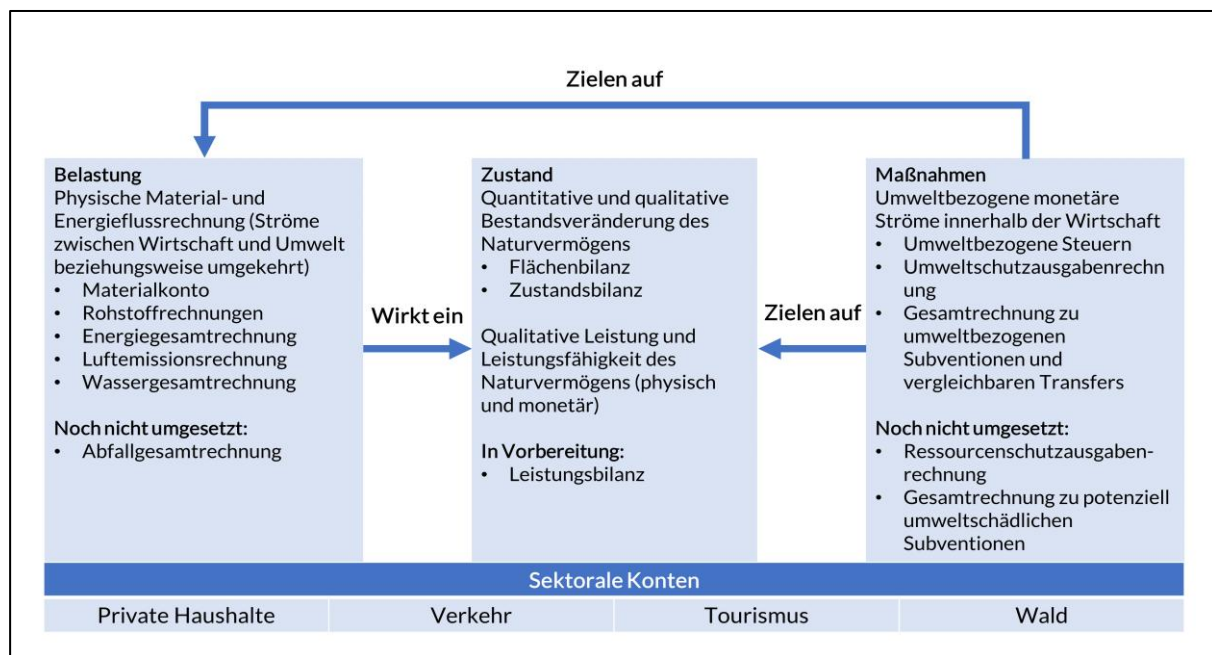


Abbildung 35: Aufbau der UGR und Beziehungen zwischen den Konten (Statistisches Bundesamt, 2025d)

Die UGR umfasst, wie die Abbildung zeigt, verschiedene Konten, die für Analysen und Politikfolgenabschätzungen genutzt werden (Statistisches Bundesamt, 2025d):

- Luftemissionsrechnung: Luftschadstoffe
- Luftemissionsrechnung: Treibhausgas-Emissionen
- Indirekte Emissionen: Gesamtwirtschaftliche CO₂-Emissionen
- Energiegesamtrechnungen
- Indirekte Energieflüsse: Gesamtwirtschaftliche Energieflüsse
- Gesamtwirtschaftliches Materialkonto
- Rohstoffäquivalente
- Wassergesamtrechnungen
- Flächenbilanz der Ökosysteme nach Ökosystemtypen
- Zustandsbilanz der Ökosysteme nach Ökosystemtypen
- Umweltschutzausgabenrechnungen
- Umweltbezogene Steuern
- Europäisches Emissionshandelssystem (EU-ETS)
- Nationales Emissionshandelssystem (nEHS)
- Waldgesamtrechnungen
- Verkehr und Umwelt
- Private Haushalte und Umwelt
- Umweltwirkungen des Tourismus

Für die Informationen zur Zirkulären Wirtschaft sind insbesondere das Gesamtwirtschaftliche Materialkonto und die Konten zu den Rohstoffäquivalenten grundlegend. Sie werden im Folgenden



im Überblick vorgestellt. Die Abfallgesamtrechnung befindet sich noch im Aufbau, wird aber ebenso relevant für die Bewertung der CE werden.

6.2.1.1 Das Gesamtwirtschaftliche Materialkonto

Destatis erstellt das gesamtwirtschaftliche Materialkonto (im Folgenden: Materialkonto) jährlich. Das Materialkonto enthält Informationen zur Entnahme von Rohstoffen und Gasen aus der Umwelt, Informationen zur Abgabe von Material, Rohstoffen und Gasen an die Umwelt sowie zu Importen und Exporten von Rohstoffen, Halb- und Fertigwaren.

Die Informationen werden in physischen Mengen (Tausend Tonnen) ab dem Jahr 1994 bis t-2 Jahren, also aktuell bis 2023, bereitgestellt. Im Jahr 1994 waren die Materialaufwendungen aufgrund der Bautätigkeit in den ostdeutschen Bundesländern auf dem Höhepunkt, so dass die Statistik mit diesem Basisjahr einen Rückgang ausweisen kann.

Die Tabellen zur Entnahme sind nach Rohstoffgruppen bzw. Gasen geordnet und enthalten insgesamt 38 Rohstoffgruppen und 2 Gase sowie Angaben zur ungenutzten Entnahme von 8 Kategorien. Diese werden in der folgenden Tabelle aufgeführt.

Tabelle 11: Übersicht über Inhalte im Tabellenblatt Entnahme (eigene Zusammenstellung auf der Basis von Statistisches Bundesamt (2025d))

Rohstoffgruppen	Gase	Ungenutzte Entnahme
Steinkohle	Sauerstoff	Abraum/ Bergematerial von Energieträgern
Braunkohle	Stickstoff	... darunter: Abraum der Braunkohle
Torf		Bergematerial von Erzen
Erdöl		Bergematerial von Steinen, Erden und Industriemineralen
Erdgas, Grubengas und Erdölgas		Nichtverwertete Biomasse
Sonstige fossile Energieträger		Pflanzliche Biomasse aus der Landwirtschaft
Eisenerze		Pflanzliche Biomasse aus der Forstwirtschaft
Aluminiumerze		Biomasse von Tieren: Beifang der Fischerei
Kupfererze		Boden, Steine und Baggergut 6 7
Sonstige Nicht-Eisenerze		
Bausande und andere natürliche Sande		
Brechsande, Körnungen, Splitt, Mehl von Natursteinen		
Kieselsaure Sande und Quarzsande		
Kiese und Feldsteine		
Naturstein		
Kalk-, Gipsstein und Anhydrit		
Kreide und Dolomit		
Lehm (Ziegelton)		
Kaolin und andere Spezialtone		



Steinsalz, Siedesalz, Industriesole (in t NaCl)		
Kalisalze, Schwefel(-kies), Fluss-, Schwespat, sonstige chemische und Düngemittelminerale		
Sonstige mineralische Rohstoffe		
Getreide zur Körnerernte (ohne Mais)		
Getreide zur Ganzpflanzenernte, Mais		
Zuckerrüben		
Kartoffeln und andere Hackfrüchte		
Gemüse		
Hülsenfrüchte		
Obst 1		
Ölhaltige Früchte		
Zwischenfrüchte, Grünland, Ernterückstände 2		
Zierpflanzen, andere pflanzliche Biomasse		
Nadelholz		
Laubholz		
Fangmengen der Hochsee- und Küstenfischerei		
Krabben, Muscheln und andere Krusten- und Weichtiere		
Fangmengen der Binnenfischerei		
Jagdstrecke		

Die Tabellen zu Abgaben an die Umwelt enthalten verwertete Abgaben an die Umwelt (Luft, Emissionen in Abwasser, Dissipativer Gebrauch von Materialien, dissipative Verluste), verwertete Abgabe von Gasen sowie nicht-verwertete inländische Abgaben von Rohstoffen. Die folgende Tabelle zeigt die Inhalte in der Übersicht.

Tabelle 12: Übersicht über Inhalte im Tabellenblatt Abgaben an die Umwelt (eigene Zusammenstellung auf der Basis von Statistisches Bundesamt (2025d))

Verwertete Abgaben an die Umwelt	Verwertete Abgabe von Gasen	Nicht-verwertete inländische Abgabe von Rohstoffen
Treibhausgase	Wasserdampf	Abraum / Bergematerial von Energieträgern
Kohlendioxid (CO ₂) durch Verbrennung und Industrieprozesse		...Abraum der Braunkohle
Kohlendioxid (CO ₂) durch Atmung von Menschen und Nutztieren		Bergematerial von Erzen
Methan (CH ₄)		Bergematerial von Steinen, Erden und Industriemineralen
Distickstoffoxid (N ₂ O)		Pflanzliche Biomasse aus der Landwirtschaft



Teilhalogenierte Fluorkohlenwasserstoffe (HFC)		Pflanzliche Biomasse aus der Forstwirtschaft
Perfluorierte Kohlenwasserstoffe (PFC)		Biomasse von Tieren: Beifang der Fischerei
Schwefelhexafluorid (SF ₆)		Boden, Steine und Baggergut
Kohlenmonoxid (CO)		
Stickoxide (NO _x)		
Schwefeldioxid (SO ₂)		
Ammoniak (NH ₃)		
Flüchtige organische Verbindungen außer Methan (NMVOC) 1		
Partikel (Staub) 1		
Schwermetalle		
Persistente organische Schadstoffe (POPs)		
Stickstofftrifluorid (NF ₃)		
Stickstoff (N)		
Phosphor (P)		
Schwermetalle		
Sonstige Substanzen und (organisches) Material		
Dissipativer Gebrauch von Produkten		
...Organischer Dünger		
...Mineralischer Dünger		
...Pflanzenschutzmittel		
...Saatgut		
...Streusalz		
...Lösungsmittel		
Dissipative Verluste (Reifen-, Brems- und Straßenabrieb)		

Im- und Exporte werden nach Fertigungsgrad (Rohstoffe, Halb- bzw. Fertigwaren) entlang der Rohstoffgruppen, die auch der Entnahme hinterlegt sind, berichtet (siehe Tab. 11). Auch hier liegen die Daten ab 1994 vor. Im Materialkonto ist bspw. zu sehen, dass die inländische Entnahme von Rohstoffen um 35 % seit 1994 zurückgegangen ist, zurückzuführen insbesondere auf den Rückgang der Nutzung von Kohlen. Gleichzeitig sind die Im- und Exporte (ohne Rohstoffrucksäcke) um 13 % bzw. 61 % gestiegen. Im Ergebnis ist der direkte Materialeinsatz (DMI) um 22 % und die inländische Materialverwendung (DMC) um 34 % gesunken (Destatis, 2025d).

6.2.1.2 Das Konto Rohstoffäquivalente

Destatis erstellt in unregelmäßigen Abständen Bericht und Datensatz zu den gesamtwirtschaftlichen Stoffflüssen in der Einheit Rohstoffäquivalente (Raw Material Equivalents, RME). Importe und Exporte werden dabei nicht wie im Materialkonto in ihrem Eigengewicht bilanziert, sondern einschließlich der materiellen Aufwendungen, die für ihre Produktion entlang



der Wertschöpfungskette aufgewendet werden müssen. Die Systemgrenze der Bilanzierung der Im- bzw. Exporte gleichen damit der Systemgrenze der Bilanzierung der heimischen Entnahme.

Die Rechnungen von Destatis basieren auf einem Input-Output-Modell, dessen Kern die monetäre Verflechtungsmatrix aus den Volkswirtschaftlichen Gesamtrechnungen (VGR) darstellt. Auch die Struktur und Definitionen sowie die grundlegenden Konzepte folgen der VGR, so dass eine Vergleichbarkeit gegeben und verknüpfte Auswertungen möglich sind.

Folgende Tabellen sind in der aktuellen Veröffentlichung verfügbar (Statistisches Bundesamt, 2025c):

- Aufkommen und Verwendung in Rohstoffäquivalenten nach Rohstoffgruppen, 2022
- Inländische Entnahme von Rohstoffen, 2010 bis 2022
- Direkter und indirekter Import von Rohstoffen, 2010 bis 2022
- Direkter und indirekter Einsatz von Rohstoffen bei der Herstellung aller Güter für den Konsum privater Haushalte, 2010 bis 2022
- Direkter und indirekter Einsatz von Rohstoffen bei der Herstellung aller Güter für den Konsum des Staates und der privaten Organisationen ohne Erwerbszweck, 2010 bis 2022
- Direkter und indirekter Einsatz von Rohstoffen bei der Herstellung aller Güter für Investitionen in Ausrüstungen und sonstige Anlagen, 2010 bis 2022
- Direkter und indirekter Einsatz von Rohstoffen bei der Herstellung aller Güter für Investitionen in Bauten, 2010 bis 2022
- Direkter und indirekter Einsatz von Rohstoffen bei der Herstellung aller Güter für Vorratsveränderungen, 2010 bis 2022
- Direkter und indirekter Einsatz von Rohstoffen bei der Herstellung aller Güter für den Export, 2010 bis 2022
- Gesamtes Aufkommen oder gesamte letzte Verwendung von Rohstoffen (Raw Material Input, RMI), 2010 bis 2022
- Physische Handelsbilanz, 2010 bis 2022
- Direkter und indirekter Einsatz von Rohstoffen bei der Herstellung aller Güter für Konsum und Investitionen ("Rohstofffußabdruck", Raw Material Consumption, RMC), 2010 bis 2022
- Direkter und indirekter Einsatz von Rohstoffen bei der Herstellung aller Güter für Konsum und Investitionen ("Rohstofffußabdruck", Raw Material Consumption, RMC) pro Kopf, 2010 bis 2022
- Direkter und indirekter Einsatz von Rohstoffen bei der Herstellung der Güter für Konsum und Investitionen ("Rohstofffußabdruck", Raw Material Consumption, RMC) nach Gütergruppen, 2010 bis 2022
- Direkter und indirekter Einsatz von Rohstoffen bei der Herstellung der Güter für den Export nach Gütergruppen, 2010 bis 2022
- Produktivitätsindikatoren (RMI), 2010 bis 2022
- Produktivitätsindikatoren (RMC), 2010 bis 2022

Zentrale Ergebnisse zeigen bspw., dass die Gesamtrohstoffproduktivität zwischen 2010 und 2023 um 27 % angestiegen ist und der Primärrohstoffverbrauch pro Person im selben Zeitraum mit



leichten Schwankungen konstant um die 15 Tonnen pro Person liegt. (Statistisches Bundesamt, 2025c)

Die Umweltökonomischen Gesamtrechnungen basieren, wie eingangs beschreiben, auf internationalen Übereinkommen und (weitmöglich) international harmonisierten Berechnungsstandards. Darüber hinaus entwickeln einzelne Länder weitere Indikatoren zur Messung der Kreislaufwirtschaft auf makro-ökonomischer Ebene. Manche der Indikatoren lehnen sich an Indikatoren der EU an, andere sind eigenständig entwickelte Indikatoren. Sie werden im Folgenden zunächst mit Blick auf Deutschland und danach mit Blick auf die EU beschrieben.

6.2.2 Aktuelle gesamtwirtschaftliche Indikatoren für die Kreislaufwirtschaft in Deutschland

6.2.2.1 Übersicht über den Bewertungsrahmen in der Nationalen Kreislaufwirtschaftsstrategie

Wie im Kapitel 5.1.2 eingeführt, ist die Nationale Kreislaufwirtschaftsstrategie (NKWS) die zentrale Strategie für die Förderung der Kreislaufwirtschaft in Deutschland (BMUKN, 2024). Da gegenwärtig noch kein abgestimmtes Monitoring-Konzept insbesondere für die Ziele der Handlungsfelder vorliegt, wird im Folgenden nur der Bewertungsrahmen für die zentralen makro-ökonomischen Ziele dargestellt.

6.2.2.2 Die CMUR

Die Circular Material Use Rate (CMUR) ist ein Indikator für die Schließung von Stoffkreisläufen. Der Indikator wird jährlich von Eurostat berechnet und veröffentlicht, der Zeitverzug liegt bei 2 Jahren. 2023 liegt der Wert für Deutschland bei 13,9 % (Eurostat, 2025a), das heißt, knapp 14 % aller genutzten primären und sekundären Materialien sind wiederverwertete Materialien. Die Methodik zur Berechnung der CMUR wird von Eurostat in einem Handbuch vorgegeben (Eurostat, 2018). Für die Berechnung gibt es verschiedene Varianten, unter anderem deswegen, weil nicht alle Informationen in allen EU-Ländern vorliegen bzw. weil bestimmte Datensätze unterschiedlich aufbereitet werden. Die Berechnungsformel lautet:

$$CMUR = \text{zirkulär genutzte Materialien} / \text{gesamte Materialnutzung}$$

Für den Nenner wird der Indikator Domestic Material Consumption (DMC) vorgeschlagen; auch der Indikator Raw Material Consumption (RMC) ist zulässig. Der RMC verrechnet zusätzlich zum DMC den Materialfußabdruck der Im- und Exporte. Im Zähler soll die Menge der tatsächlich genutzten wiederverwendeten Rohstoffe einfließen; da diese Informationen jedoch nicht vorliegen, wird im Zähler die Menge der Abfälle, die einer stoffliche Wiederverwendung zugeführt werden, aus der Abfallstatistik als Proxy von Eurostat vorgeschlagen. Varianten beinhalten bspw. die Einbeziehung von energetisch genutzten Abfällen und Verfüllungen. Importierte Sekundärrohstoffe werden in der CMUR nicht berücksichtigt, exportierte Sekundärrohstoffe werden im Zähler aufgenommen. Der Indikator überschätzt somit die Sekundärrohstoffnutzung, da er im Wesentlichen die Sammelquote widerspiegelt.

Bezüglich dieses Indikators ist zu empfehlen:

- In den Zähler nur die Mengen an Sekundärmaterialien aufzunehmen, die tatsächlich wieder genutzt wird.
- Die CMUR nach Rohstoffgruppen auszuweisen.
- Die Verwendung der Primär- und Sekundärrohstoffe zu differenzieren.



6.2.2.2.1 Siedlungsabfälle

Der Rückgang der Siedlungsabfälle pro Kopf ist ein Indikator für Abfallvermeidung. De facto ist das Siedlungsabfallaufkommen pro Kopf seit 1996 gestiegen und seit 2011 mit wenigen Schwankungen konstant geblieben.

Siedlungsabfälle umfassen alle Haushaltsabfälle und ähnliche gewerbliche und industrielle Abfälle sowie Abfälle aus Einrichtungen (Abfälle des Abfallkapitels 20) und Verpackungen (Abfallgruppe 1501). Siedlungsabfälle sind ein Teilstrom des gesamten Abfallaufkommens, 2022 stellten die Siedlungsabfälle rund 13,2 % des gesamten Abfallstroms dar (Umweltbundesamt, 2024). Das Aufkommen pro Kopf liegt im selben Jahr bei 576 kg (Statistisches Bundesamt, 2025a). Der Indikator wurde bis 2020 jährlich in der Abfallbilanz des Statistischen Bundesamtes veröffentlicht, seitdem im Statistischen Bericht – Abfallbilanz. Grundlage ist das Umweltstatistikgesetz (UStatG) von 2005, zuletzt geändert am 8. Mai 2024. Die Erhebung der Siedlungsabfälle ist eine Totalerhebung, basierend auf einer Vielzahl von Erhebungen durch die Abfallämter, zusammengeführt durch die Statistischen Ämter der Bundesländer. Methodische Qualitätsberichte werden zusätzlich zu den jährlichen Abfallbilanzen von Destatis vorgelegt. Der Indikator ist aussagekräftig, er wird international breit genutzt. Die in Kapitel 5.1.1 genannten Empfehlungen zur Abfallstatistik allgemein gelten auch für diesen Indikator.

6.2.2.2.2 Beitrag der zirkulären Wirtschaft zur Versorgungssicherheit

Im Critical Raw Material Act (CRMA) legte die Europäische Kommission Ziele und Maßnahmen zur Verbesserung der Versorgungssicherheit mit strategischen Rohstoffen fest. Der CRMA basiert auf drei Säulen: die Versorgung über heimischen Bergbau, die Versorgung über Recycling und zirkuläre Wirtschaft und die Streuung der Importe zur Verringerung von Abhängigkeiten.

Ein europaweit einheitlicher Bewertungsmaßstab wird aktuell entwickelt. Bezogen auf die zweite Säule ist ein rohstoffbezogener Indikator „Anteil der über zirkuläres Wirtschaften gewonnenen Rohstoffmenge bezogen auf den Gesamtverbrauch des Rohstoffes“ im Gespräch. Eine harmonisierte Berechnungsmethode existiert aktuell noch nicht. Es ist daher empfehlenswert, eine solche zu entwickeln. Zusätzlich ist zu empfehlen, den Bewertungsrahmen der Abfallwirtschaft und die Erfordernisse der Rohstoffversorgung weitergehend zu harmonisieren (siehe Empfehlungen in Kapitel 5.1.1)

6.2.2.2.3 Primärrohstoffverbrauch

Der Primärrohstoffverbrauch (RMC) zeigt die physische Menge der Rohstoffe, die der Umwelt entnommen und erstmalig in Form von Produkten genutzt werden, bezogen auf eine Volkswirtschaft. Der Pro-Kopf-Verbrauch liegt 2022 bei 14,4 Tonnen (Statistisches Bundesamt, 2025c). Importe und Exporte werden in Rohmaterialäquivalente umgerechnet, und damit der Bezugsgrenze bei der Erhebung der heimischen Entnahme vergleichbar gemacht. Die Umrechnung basiert auf Modellrechnungen, da die Vielzahl der Im- und Exporte nicht einzeln und vergleichbar erhoben werden können. Die Ausweisung beinhaltet verschiedene Differenzierungen, darunter nach Materialgruppen, Wirtschaftssektoren und Komponenten wie Entnahme oder Handel (siehe Kapitel 5.2.1.2).

Sekundärrohstoffe werden in den Daten von Destatis als Teil der Vorratsveränderungen und Nettozuwachs an Wertsachen bilanziert. Hierbei werden Rohstoffflüsse, die aus der Verwendung zurück in die Produktion fließen, über den Abfallsektor als negative Werte bilanziert. Aufgrund der Rechenweise mindern die Sekundärrohstoffe damit rechnerisch den Primärrohstoffverbrauch. Der RMC in dieser Rechenvariante spiegelt folglich nicht den Primärrohstoffverbrauch wider, sondern eine Variante von Netto-Stoffflüssen. Das methodische Vorgehen bei Eurostat ist anders:



Sekundärrohstoffflüsse, die in den Im- bzw. Exporten enthalten sind, werden anteilmäßig abgezogen, so dass ausschließlich die Primärrohstoffflüsse erhoben werden.

Es wird empfohlen,

- die Erhebung der RMC weiter auf Primärrohstoffe zu fokussieren und
- Sekundärrohstoffe gesondert auszuweisen. Dies kann als Zusatzinformation zu den Sekundärrohstoffmengen und/oder als Ausweisung in theoretische Mengen der „eingesparten Primärrohstoffäquivalente“ erfolgen.

6.2.2.2.4 DIERec

Die direkten und indirekten Effekte der Verwertung (DIERec) zeigen den theoretischen Einspareffekt der Sekundärrohstoffe in einer Volkswirtschaft. Die aktuellste Zahl liegt für das Jahr 2013 vor: so lag der Einspareffekt durch die zirkuläre Wirtschaft insgesamt bei 493 Mio. Tonnen (Umweltbundesamt, 2025).

Der DIERec wurde im Rahmen eines Forschungsprojekts vom Wuppertal Institut im Auftrag des Umweltbundesamtes entwickelt und für 30 Stoffflüsse erhoben (Umweltbundesamt, 2025). Eine Aktualisierung erfolgt gegenwärtig im Rahmen des Projekts „Ökologische Begleitforschung der Nationalen Kreislaufwirtschaftsstrategie“ durch das Wuppertal Institut. Der DIERec basiert auf Stoffstromanalysen von Sekundärrohstoffen. Zusätzliche Aufwendungen für die Aufbereitung (Energie, sonstige Inputs) werden Aufwendungen gegenübergestellt, die notwendig werden würden, wenn die gleiche Rohstoffmenge aus Primärmaterialien hergestellt werden würde. Gleiches wird für den Energiebedarf sowie für Umweltbelastungen wie Treibhausgasemissionen durchgeführt. Es wird empfohlen, diesen Indikator zukünftig regelmäßig zu erheben.

6.2.2.2.5 Fußabdruck des Konsums

Der Primärrohstoffverbrauch beinhaltet den Konsum der privaten Haushalte, der staatlichen und nicht-staatlichen Investitionen sowie die Investitionen. In der NKWS wird der Indikator Fußabdruck des Konsums nicht spezifiziert, denkbar ist die Ausweisung des Anteils des RMC der privaten Haushalte. Dieser lag im Jahr 2022 bei 6,7 Tonnen pro Person bzw. 555 Mio. Tonnen (Statistisches Bundesamt, 2025b). Eine eigenständige Ausweisung erfolgt nicht, die Daten zum Konsum der privaten Haushalte sind jedoch in den Datensätzen der Umweltökonomischen Gesamtrechnungen zu den Rohstoffäquivalenten enthalten (siehe Kap. 5.2.1.1.4.) Es wird empfohlen, diesen Indikator getrennt nach Bedarfsebenen auszuweisen. Dafür können die Haushaltsstatistiken genutzt werden, wie dies bspw. von (Purr et al., 2019) im RESCUE-Projekt umgesetzt wurde. Dies könnte ein Baustein sein, um den Beitrag der Bürger zu höheren R-Strategien zu monitoren. Weitere Bausteine sind unter anderem die Sekundärrohstoffanteile im Konsum der privaten Haushalte sowie die Inanspruchnahme von Reparatur- und Sharing-Dienstleistungen.

6.2.2.2.6 Patente

Es ist bislang kein spezifischer Indikator in der Kreislaufwirtschaftsstrategie festgelegt. Allerdings werden im europäischen Überwachungsrahmen die Anzahl der Patente, die sich auf Recycling und Sekundärmaterialien beziehen, gemonitort (Eurostat, 2024).

6.2.2.2.7 Sozialversicherungspflichtige Arbeit

In der NKWS ist kein spezifischer Indikator genannt. Im europäischen CE-Überwachungsrahmen wird der Indikator Beschäftigte in Sektoren der Kreislaufwirtschaft als Anteil der Gesamtbeschäftigung jährlich und für alle EU-Länder erhoben (Eurostat, 2025a).



6.2.2.2.8 Entkopplung bzw. Gesamtressourcenproduktivität

Die Gesamtressourcenproduktivität bemisst die Wertschöpfung (BIP und Wert der Importe) pro Rohstoffinput in Rohstoffäquivalenten (RMI). Der Indikator ist vor allem im Zeitvergleich interessant. Der Anstieg zwischen 2010 und 2022 beträgt 27 Indexpunkte oder 1,6 % pro Jahr. Die Daten werden von Destatis in unregelmäßigen Abständen berechnet und veröffentlicht. Die Ergebnisse sind in den Datensätzen der Umweltökonomischen Gesamtrechnungen zu den Rohstoffäquivalenten enthalten (siehe Kapitel 5.2.1.1.4.). Die Empfehlungen, die zur Berechnung des RMC ausgesprochen wurden (Kapitel. 5.2.2.1.4), gelten hier ebenso.

6.2.2.2.9 Zusammenfassender Überblick

Im Folgenden werden die zentralen Indikatoren entlang der R-Strategien zusammengefasst. Indikatoren, für die aktuell noch keine Konzeption bzw. Berechnungsgrundlage vorliegt, können noch nicht erfasst werden.

Tabelle 13: Übergeordnete Indikatoren der NKWS und ihr Bezug zu R-Strategien

R-Strategie	Indikator	Datenquelle
R0 Refuse	(Indikatoren zum Siedungsabfall)	Destatis
R1 Rethink		
R2 Reduce	Gesamtrohstoffproduktivität	Destatis
R3 Reuse		
R4 Repair		
R5 Refurbish		
R6 Remanufacture		
R7 Repurpose		
R8 Recycle	CMUR DIERec Beitrag zur Versorgungssicherheit	Eurostat
R9 Recover		
Grundgesamtheit Primäre Stoffflüsse	1. Primärrohstoffverbrauch pro Kopf 2. Fußabdruck der Haushalte 3. Rückgang der Siedlungsabfälle	Destatis

Die Tabelle zeigt, dass nur bestimmte R-Strategien, und zwar vor allem das Recycling und die R-Strategie Reduce, sofern sie mit der Steigerung der Materialeffizienz korrekt interpretiert ist, gegenwärtig auf makro-ökonomischer Ebene von politischer Seite adressiert werden.

6.2.3 Bewertungsrahmen auf EU-Ebene

Kreislaufwirtschaft oder zirkuläre Wirtschaft wird zunehmend von verschiedenen Ländern gefördert. Da hier keine Erhebung all dieser Ansätze geleistet werden kann, wird im Folgenden kurz auf den Bewertungsrahmen der EU eingegangen. Alle Indikatoren des EU-Überwachungsrahmens (Circular Economy Monitoring Framework (Eurostat, 2025b)) werden von Eurostat einzeln und detailliert beschrieben und können für die EU-27 gesamt und für alle EU-27-Länder und damit auch für Deutschland abgerufen werden. Die Indikatoren sollen im Folgenden im Überblick aufgeführt werden:



- Produktion und Verbrauch
 - Materialfußabdruck in Tonnen pro Kopf
 - Ressourcenproduktivität als Index (2000 = 100)
 - Grüne öffentliche Auftragsvergabe (derzeit noch ohne Quantifizierung)
 - Gesamtabfallaufkommen pro Kopf
 - Erzeugung von Abfällen ohne dominante mineralische Abfälle je BIP-Einheit (kg/Tsd. €, verkettetes Volumen (2010))
 - Aufkommen von Siedlungsabfällen pro Kopf
 - Lebensmittelabfälle pro Kopf
 - Verpackungsabfälle pro Kopf
 - Erzeugung von Verpackungsabfällen aus Kunststoff pro Kopf
- Abfallwirtschaft
 - Recyclingquote von Siedlungsabfällen (%)
 - Recyclingquote für alle Abfälle ohne dominante mineralische Abfälle (%)
 - Recyclingrate für den gesamten Verpackungsmüll (%)
 - Recyclingrate von Kunststoffverpackungen (%)
 - Wiederverwendungs- und Recyclingquote getrennt gesammelter Elektro- und Elektronik-Altgeräte (%)
- Sekundäre Rohstoffe
 - Nutzungsrate wiederverwendbarer Stoffe, CMUR (%)
 - Verwendungsrate von recyceltem Altmaterial (EOL-RIR) für Rohstoffe, Aluminium (%)
 - Importe aus Nicht-EU-Länder von wiederverwertbaren Grundstoffen (Tsd. Tonnen)
 - Exporte in Nicht-EU-Länder von wiederverwertbaren Grundstoffen (Tsd. Tonnen)
 - Handel innerhalb der EU von wiederverwertbaren Grundstoffen (Tsd. Tonnen)
- Wettbewerbsfähigkeit und Innovation
 - Private Investitionen mit CE-Bezug (% des BIP)
 - Beschäftigte mit CE-Bezug (% der Gesamtbeschäftigung)
 - Bruttowertschöpfung (% des BIP)
 - Patente mit CE-Bezug, insb. Abfallbewirtschaftung und -recycling (Anzahl)
- Globale Nachhaltigkeit und Resilienz
 - Fußabdruck des Konsums (Index, 2010=100)
 - THG-Emissionen aus Verarbeitung, Fertigung und Dienstleistungen (kg pro Kopf)
 - Abhängigkeit von Materialimporten (%)
 - EU-Selbstversorgung mit Rohstoffen, Aluminium (%)

Die Indikatoren des Europäischen Überwachungsrahmens adressieren unterschiedliche R-Strategien, wie die nachfolgende Tabelle zeigt. Sie decken, im Vergleich zur NKWS, eine größere Breite der R-Strategien ab, wobei beachtet werden muss, dass noch nicht alle Indikatoren der Handlungsfelder der NKWS festgelegt und berücksichtigt sind.



Tabelle 14: Europäische CE-Überwachungsrahmen mit Bezug zu den R-Strategien (eigene Zusammenstellung auf Basis von Eurostat)

R-Strategie	Indikator	Datenquelle
R0 Refuse	(Indikatoren zu Abfällen)	Eurostat
R1 Rethink	(Grüne öffentliche Auftragsvergabe)	
R2 Reduce	Ressourcenproduktivität	Eurostat
R3 Reuse	Handel mit wiederverwertbaren Grundstoffen	Eurostat
R4 Repair		
R5 Refurbish	Wiederverwertung von Elektro(nik)altgeräten	Eurostat
R6 Remanufacture		
R7 Repurpose		
R8 Recycle	Alle Recyclingraten CMUR Beitrag zur Versorgungssicherheit	Eurostat
R9 Recover		
Grundgesamtheit Primäre Stoffflüsse	Materialfußabdruck, Fußabdruck d. Konsums Indikatoren zu Abfällen	Eurostat

6.2.4 Lücken der makro-ökonomischen Indikatoren zur Messung der Kreislaufwirtschaft

Wie die Analyse des deutschen und europäischen Überwachungsrahmen gezeigt hat, sind die Daten zur Grundgesamtheit der primären Stoffflüsse auf makroökonomischer Ebene bereits weitgehend etabliert. Dies gilt jedoch nicht im gleichen Ausmaß für Daten zu Sekundärrohstoffflüssen und noch weniger für Daten zu weiteren R-Strategien.

R8 Recycling: Rezyklatmengen werden aktuell vor allem auf der Basis der Abfalldaten geschätzt. In zentralen Indikatoren wie der CMUR wird der Wert der Abfallmenge, die einer Wiederverwertung zugeführt wird, genutzt. Dissipative Verluste während der Aufbereitung werden dadurch ignoriert, ebenso die Frage, ob die aufbereiteten Mengen auch tatsächlich wieder genutzt werden. Für eine gute Messung der tatsächlich stattfindenden Kreislaufwirtschaft wird die Information jedoch benötigt (z. B. Umweltbundesamt (2019b)). Die Informationen werden für den Indikator DIERec erhoben bzw. geschätzt (Umweltbundesamt, 2019a). Der Indikator ist noch nicht im statistischen System der Kreislaufwirtschaft etabliert und wird bislang in unregelmäßig stattfindenden Einzelprojekten erhoben.

R7 Repurpose: Die Nutzung eines Produkts oder Produktteils für einen anderen Zweck ist aktuell nicht mit einem Indikator und damit auch nicht mit Daten hinterlegt (siehe bspw. Psarommatis et al. (2025)). Repurpose ist bspw. aus dem Energiebereich bekannt, wenn Altbatterien aus Fahrzeugen zu Energiespeicher umfunktioniert werden.

R6 Remanufacture: Auch für diese R-Strategie wurde noch kein makro-ökonomischer Indikator formuliert, entsprechend finden sich bislang noch keine Datensätze. Kurilova-Palisaitiene et al.



(2024) entwickelten einen vierstufigen Indikator für Remanufacture Readiness Level für Autozuliefererbetriebe über das Ausmaß und die Regelmäßigkeit der Austauschbeziehungen mit Remanufacturing-Betrieben. Dies lässt sich jedoch nicht auf Unternehmen übertragen, die gleichzeitig produzieren und Altteile aufbereiten, und ebenso wenig auf Unternehmen, die nur Altteile aufbereiten.

R5 Refurbish: Die Wiederinstandsetzung von Produkten ist aus verschiedenen Branchen bekannt, ein branchenübergreifender makro-ökonomischer Indikator steht jedoch noch aus. Ein gutes Beispiel ist die Sanierung von Gebäuden, die jedoch selten unter Refurbishment gezählt wird. Ein anderes Beispiel sind Wasserzähler, die nach einigen Jahren vom Hersteller oder den zuständigen Stadtwerken zurückgenommen, neu geeicht und dann in derselben Funktion wieder genutzt werden.

R4 Repair: Reparaturen sind so gängig, dass sie als eigenständiger Wirtschaftszweig von anderen Wirtschaftszweigen unterschieden werden. Die Wirtschaftsstatistik unterscheidet dabei aufgrund des Wertes KfZ-Reparaturen von anderen Reparaturen, die von Endkunden in Anspruch genommen werden (Schuster, Näher, Radreparaturstätten etc.). Zudem werden eine Vielzahl unterschiedlichster Wartungen und Reparaturen von Maschinen erfasst, die von Unternehmen beauftragt werden. Reparaturen können somit hinsichtlich ihres monetären Wertes und des Anteils der Beschäftigten grundsätzlich gut makroökonomisch erfasst werden.

R3 Reuse: Für die R-Strategie Reuse ist kein makro-ökonomischer Indikator im Rahmen des europäischen oder deutschen CE-Überwachungsrahmens formuliert. Ebenso wenig gibt es standardisierte Daten (siehe bspw. Psarommatis et al. (2025)). Auf der Ebene der privaten Endverbraucher werden unter Reuse bspw. Secondhand-Läden oder Flohmärkte gezählt (Kriterium: Wechsel des Besitzers bei gleichbleibenden Produkten und ihrer Verwendung, gezählt werden könnten die monetären oder physischen Beträge oder die Anzahl von Läden bzw. Märkten). Für die Industrie könnten industrielle Symbiosen vergleichbar sein. Ein Monitoring der Anzahl bzw. der dort stattfindenden Aktivitäten findet jedoch nicht statt.

R2 Reduce: Der reduzierte Einsatz von Rohstoffen in einer Volkswirtschaft wird inzwischen standardmäßig und regelmäßig erhoben und gehört zu den Nachhaltigkeitsindikatoren. Der klassische Indikator Rohstoffproduktivität bzw. Gesamtrohstoffproduktivität weist die Veränderung des wirtschaftlichen Outputs pro Materialeinsatz aus. Die konkrete Berechnung ist in Deutschland anders als in der EU bzw. im internationalen Vergleich. So wird hier der Indikator Gesamtrohstoffproduktivität genutzt, der als Quotient aus der letzten Verwendung (BIP und monetärer Wert der Importe) und dem Rohmaterialeinsatz (RMI) definiert ist. Auch die Veränderung des Primärrohstoffverbrauchs könnte als makroökonomischer Indikator für das Reduzieren interpretiert werden.

R1 Rethink: Die Strategie „Überdenken“ umfasst Aktivitäten, mit denen die Nutzungsintensität erhöht wird. Es geht darum zu überdenken, ob ein Produkt besessen werden muss, oder ob nicht auch ein anderer Ansatz möglich wäre, bspw. Ansätze im Bereich Sharing oder Produkte als Dienstleistung. Einen makro-ökonomischen Indikator, der mit entsprechenden Daten hinterlegt wäre, gibt es bislang nicht. Allerdings gibt es für wenige Branchen eigene Sharing-Unternehmensfelder, die mit Branchendaten erfassbar sind; Car-Sharing ist ein prominentes Beispiel.

R0 Refuse: Der Verzicht ist nicht empirisch sauber messbar. Auf makro-ökonomischer Ebene behilft man sich damit, dass Szenarien formuliert werden, in denen Änderungen im Konsumenten-Verhalten, die Verzichts- bzw. Suffizienzansätze enthalten, gegenüber Szenarien ohne diese



Änderungen gerechnet werden. Dadurch können annahmebasiert Größenordnungen ermittelt werden, die den potenziellen Impact von Verzicht bzw. Suffizienz aufzeigen.

Für nahezu alle R-Strategien ist eines zu bemerken: Wenn über CE monetäre Einsparungen erzielt werden, ist zu fragen, wofür das Geld anstelle dessen ausgegeben wird. Dies gilt für Unternehmen ebenso wie für Privatpersonen, Organisationen und den Staat. Die dann zusätzlich getätigten Ausgaben bilden die Basis für den Rebound-Effekt, der nur sehr schwer zu bilanzieren ist.

6.3 Empfehlungen zur Weiterentwicklung der Indikatoren

Wie die obige Analyse zeigt, ist der Bewertungsrahmen für zirkuläre Ökonomie auf Makro-Ebene bereits weit fortgeschritten. Eine Vielzahl von Indikatoren liegen vor, mit denen verschiedene Aspekte der Kreislaufwirtschaft gemessen und beobachtet werden können. Gleichzeitig ist folgendes zusammenfassend festzuhalten:

Die gesetzlichen Vorgaben für Abfallstatistiken sind aufgrund der langen Historie bereits sehr weit fortgeschritten. Empfehlungen zu Weiterentwicklung betreffen weiterführende Differenzierungen der Rohstoffgehalte in den Abfallströmen sowie die Beurteilung der Qualität (Schadstoffbelastung), um die weitere Nutzung zu vereinfachen. Die gesetzlichen Vorgaben und Harmonisierungen zur Erhebung der Primärrohstoffnutzung ist ebenso weit fortgeschritten, auch wenn noch offene Punkte und Harmonisierungsbedarfe bestehen. Wesentliche Aspekte der Weiterentwicklung mit Blick auf die zirkuläre Wirtschaft betreffen die Verrechnungen der Sekundärrohstoffnutzung. Die Indikatoren zur Messung der Sekundärrohstoffmengen sind aktuell in der Entwicklung. Zwar liegen verschiedene Indikatoren bereits vor, wie bspw. die CMUR, aber die Rechenvorschriften sind noch sehr variabel, da die Datenbasis in den EU-Ländern noch lückenhaft und teilweise wenig vergleichbar ist. Ein Aspekt, der bei der Analyse der Bewertungsrahmen auf makro-ökonomischer Ebene nur bezogen auf das Beispiel Kunststoffe angesprochen wurde, jedoch hier aufgrund der übergeordneten Bedeutung genannt werden soll, ist die systematische Verknüpfung von Daten auf Makro-Ebene mit Daten der Mesoebene (z. B. Sektoren). Bislang werden Daten auf Mesoebene, wie das Beispiel der Kunststoffe zeigt, insbesondere von Verbänden erhoben und publiziert; die Verknüpfung mit Makro-Daten ist herausfordernd, weil unterschiedliche Definitionen und Abgrenzungen genutzt werden. Dies ist ein Aspekt, an dem zukünftig weitergearbeitet werden sollte.



7 Zusammenfassung

Im Rahmen des vorliegenden Bewertungsrahmens wurde ein systematisch aufgebautes, mehrdimensionales Instrument zur Beurteilung der Kreislauffähigkeit entwickelt, das auf die Nano-, Mikro-, Meso- und Makroebene anwendbar ist. Ziel war es, eine wissenschaftlich fundierte und gleichzeitig praxisorientierte Grundlage zu schaffen, die es ermöglicht, die Zirkularität von Produkten, Unternehmen und Wirtschaftssystemen innerhalb der Ebenen konsistent und vergleichbar zu bewerten. Die Anwendung des Rahmens auf der Nanoebene wurde exemplarisch anhand der Fallstudie „Spülmittelkonzentrat“ durchgeführt, um dessen praktische Umsetzbarkeit und Aussagekraft zu prüfen. Für die Mikro-, Meso- und Makroebene wurden umfangreiche Literatur- und Indikatorenrecherchen sowie Analysen von Statistikportalen durchgeführt, um die Verbindungen zur CE-Bewertung und eine Bewertung von vorhandenen und fehlenden Indikatoren im Kontext der CE aufzeigen zu können.

Auf der Nano-Ebene zeigen die Ergebnisse der Fallstudie, dass das Spülmittelkonzentrat gegenüber dem konventionellen Spülmittel insbesondere auf Verpackungsebene signifikante ökologische Vorteile aufweist. Auch Szenarioanalysen zur Wiederverwendung der Flasche zeigten, dass eine gesteigerte Wiederverwendungsrate zu signifikanten Reduktionen der Umweltwirkungen führen kann. Die Sensitivitätsanalysen belegten zudem, dass der Rezyklat-Anteil in der PET-Flasche einen spürbaren Einfluss auf bestimmte Umweltkategorien hat, während Transportdistanzen hingegen nur einen sehr geringen Effekt auf die Gesamtergebnisse ausüben. Ergänzend zur Ökobilanz wurde eine Zirkularitätsbewertung durchgeführt, bei den etablierten Indikatoren wie der Material Circularity Indicator (MCI) zur Anwendung kamen. Diese bestätigten, dass das Spülmittelkonzentrat eine höhere Zirkularitätsleistung aufweist und eine größere Zahl an R-Strategien (Refuse, Rethink, Reduce, Reuse, Recycle, Recover) adressiert. Die systematische Anwendung des Bewertungsrahmens zeigte, dass eine kombinierte Betrachtung von ökologischen Auswirkungen und Zirkularitätskennzahlen notwendig ist, um Zielkonflikte zwischen Kreislauffähigkeit und Nachhaltigkeit frühzeitig zu erkennen. Die Ergebnisse unterstreichen die Relevanz ganzheitlicher Bewertungsansätze im Kontext der Circular Economy, zeigen aber auch bestehende Herausforderungen auf. So ist etwa die tatsächliche Wirksamkeit zirkulärer Maßnahmen stark abhängig vom Nutzerverhalten, insbesondere bei Systemen, die auf Wiederverwendung basieren. Dies spiegelt die großen Herausforderungen der Nachhaltigkeitsbewertung wider, da für die Bewertung von Kreislaufwirtschaftsanalysen mehrkriterielle Indikatorensets benötigt werden und eine Fülle von Informationen zusammenfließen, die sich aber je nach untersuchter Lebenszyklusphase verändern und unterschiedlich gewichtet werden können. Darüber hinaus stellte sich die Auswahl geeigneter Allokationsmethoden bei der Modellierung von Recyclingprozessen als methodisch anspruchsvoll dar. Die im Projekt angewandte Kombination aus Systemerweiterung und Net-Scrap-Ansatz erwies sich jedoch als geeignet, um die Kreislaufprozesse differenziert abzubilden. Im Hinblick auf das Fallbeispiel wäre zudem eine empirische Validierung der angenommenen Nutzungspraktiken notwendig, um die Aussagekraft der Modellierungen zu untermauern.

Während die Nanoebene eine detaillierte Analyse individueller Produktsysteme ermöglicht, zeigt sich auf der Mikroebene, dass bereits etablierte Indikatorensets zur Bewertung von Zirkularität existieren und aktiv in unternehmerischen Nachhaltigkeitsberichten genutzt werden. Unternehmen greifen hierbei auf Instrumente wie den Material Circularity Indicator (MCI), die Circular Transition Indicators (CTI) oder unternehmensspezifische KPIs zurück, um interne Prozesse zu bewerten und Berichtspflichten im Rahmen von Nachhaltigkeitsstandards zu erfüllen. Die Ergebnisse zeigen, dass auf Unternehmensebene ein deutlicher Fokus auf Strategien im



Bereich Recycling und Recover besteht, möglicherweise aufgrund politischer Anforderungen (z. B. Quotenregelungen) oder betriebswirtschaftlicher Erwägungen wie Effizienzsteigerung und Kostenreduktion. Höherwertige R-Strategien wie Rethink, Reuse oder Remanufacture, die insbesondere in der Design- und Nutzungsphase große Hebel für eine nachhaltige Transformation bieten, bleiben dagegen unterrepräsentiert. Dies liegt auch daran, dass geeignete Indikatoren zur qualitativen und quantitativen Bewertung dieser Strategien fehlen. Die im Rahmen der Fallstudie „Spülmittelkonzentrat“ gewonnenen Erkenntnisse bestätigen diese Tendenz und verdeutlichen zugleich, dass durch intelligentes Produktdesign, Ressourceneinsparung und aktive Nutzerintegration konkrete Fortschritte in Richtung einer zirkulären Wirtschaft erreichbar sind. Insgesamt bildet der entwickelte Bewertungsrahmen eine fundierte Grundlage für eine wissenschaftlich belastbare und praxisnahe Beurteilung zirkulärer Unternehmenssysteme.

Für die Erleichterung der Bewertung auf der Mesoebene, wurde ein ähnliches Vorgehen zur Mikroebene gewählt. Hier geht es insbesondere um die Bewertung von Industrieparks und industriellen Symbiosen, wo mehrere Unternehmen kooperieren und Synergiepotenziale nutzen können. Die Bewertung erfordert einen ganzheitlichen Ansatz, da ökologische, ökonomische und soziale Faktoren berücksichtigt werden müssen. Auf Basis einer theorieorientierten Literaturanalyse wurden bestehende Bewertungsmethoden zusammengeführt und ein integriertes Framework entwickelt, das 272 Indikatoren nach EIP-Bestandteilen und CE-Strategien strukturiert. Das Framework steht als interaktive Tabellenkalkulation (über Zenodo) zur Verfügung und unterstützt die flexible Auswahl und Analyse von Indikatoren für Forschung und Praxis.

Auf Makroebene zeigt sich ein vergleichbares Bild, denn hier werden ebenfalls standardisierte Indikatoren bereits breit eingesetzt, etwa im Rahmen der EU-Taxonomie, des Circular Economy Monitoring Frameworks der EU oder der nationalen Berichterstattungssysteme. Diese Indikatoren bilden häufig die Grundlage für politische Entscheidungsprozesse und regulatorische Maßnahmen. Allerdings adressieren sie bislang vorrangig material- und recyclingbezogene Aspekte, während qualitative Dimensionen wie Produktdesign, Nutzungsverhalten oder soziale Effekte häufig unterrepräsentiert bleiben. Die gesammelten Erkenntnisse aus der Nanoebene lassen sich auf diese Ebene übertragen und verdeutlichen Lücken sowohl in der Abdeckung relevanter Prozessindikatoren als auch in der Kohärenz politischer und wirtschaftlicher Interessen in der Kreislaufwirtschaftsbewertung. Ein Fokus auf etablierte Strategien wie Recycling und Recover ist auch hier erkennbar, geht jedoch zulasten der höheren R-Strategien, die langfristig ein größeres Transformationspotenzial bieten. Offen bleibt zudem, wie soziale und ökonomische Dimensionen systematisch und vergleichbar in CE-Bewertungen integriert werden können. Die Weiterentwicklung des Bewertungsrahmens sollte daher auf die Schließung dieser Indikatorlücken und die Dynamisierung von Bewertungsansätzen abzielen, um Fortschritte der Kreislaufwirtschaft über verschiedene Ebenen hinweg konsistent abzubilden.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass der entwickelte Bewertungsrahmen eine belastbare Grundlage für die wissenschaftliche und praktische Bewertung zirkulärer Produktsysteme darstellt. Identifizierte Lücken in der Indikatorenanalyse sollten durch neue Indikatorensets möglichst geschlossen werden, um auf allen Ebenen eine bessere Bewertung der Kreislaufwirtschaft ermöglichen zu können. Die Entwicklung dynamischer Indikatoren, die zeitliche Entwicklungen und Marktveränderungen berücksichtigen, stellt eine vielversprechende Perspektive dar. Insgesamt liefert das vorliegende Dokument einen Beitrag zur Operationalisierung und Weiterentwicklung von Bewertungslogiken im Kontext zirkulärer Wertschöpfung.



8 Anlagen und referenzierte Dokumente

In diesem Kapitel sind die Anlagen und referenzierten Dokumente aufgeführt. Die Anlagen sind wesentlicher Bestandteil der vorliegenden Anforderungsdokumentation. Die referenzierten Dokumente wurden im Rahmen des Projektes in anderen Deliverables erstellt und werden in der vorliegenden Architekturdokumentation referenziert.

Tabelle 15: Referenzierte Dokumente

Referenzen	Beschreibung
MS 3.1.1 Leitfaden zur Datengewinnung	In diesem Meilensteindokument ist eine detaillierte Anleitung zur Erhebung von CE-Daten zu finden.



9 Anhang

9.1 Anhang A

Tabelle 16: Übersicht einiger CE-Indikatoren geordnet nach bewertbaren R-Strategien

		Indikatoren empfohlene nach Luthin et al. (2023) und DIN- / ISO-Normen	weitere Indikatoren aus Literaturrecherche
R0	Refuse	Änderung z. T. darstellbar durch MCI, PCI, LI (reduced virgin feedstock)	CE indicator prototype (CEIP) (Cayzer et al., 2017)
R1	Rethink	Änderung z. T. darstellbar durch MCI, PCI, LI (reduced virgin feedstock, unrecoverable waste generated) Average lifetime of product or material relative to industry average (ISO 59020:2024)	Cross Functional Circularity Indicator, Functional Circularity Indicator (Hatzfeld et al., 2022), CE indicator prototype (CEIP) (Cayzer et al., 2017), Circularity Potential Indicator (CPI) (Saidani et al., 2017)
R2	Reduce	MCI (incl. reduced virgin feedstock, Unrecoverable waste generated) (Ellen MacArthur Foundation, 2015), PCI (Bracquené et al., 2020), LI (Franklin-Johnson et al., 2016), Average percent renewable content of an inflow (X), Percent actual recirculation of outflow in the biological cycle, Average percent of energy consumed that is renewable energy, Percent water withdrawal from circular sources, Percent water discharged in accordance with quality requirements, Resource intensity index (RII) (ISO 59020:2024)	Resource Efficiency (Huysman et al., 2015), Material-Input Per Service Unit (Ritthoff et al., 2002), Circular-process Feedstock Intensity, Feedstock Intensity (Lokesh et al., 2020), Material Efficiency Metric (Brandström & Eriksson, 2022), CE indicator prototype (CEIP) (Cayzer et al., 2017), Circularity Index (CI) (Carmona et al., 2024), Circularity Potential Indicator (CPI) (Saidani et al., 2017)



R3	Reuse	MCI, PCI, LI (reused components), Share of Reused Components (DIN 45556), Average percent reused content of an inflow (X), Percent actual reused content derived from outflow (X), Reuse cycles of onsite water (ISO 59020:2024)	RRR Benefit Rate (Ardente & Mathieux, 2014), Accessibility Index (Soh et al., 2015), Components Recyclability (VDI 2243), Parts with label, Reversible Joints, Tools for Disassembling (Cerdan et al., 2009), Disassembly Effort Index (Das et al., 2000), Disassembly Depth (DIN 45554), Disassembly Depth Effectiveness (Giudice et al. 2009), Material Efficiency Metric (Brandström & Eriksson, 2022), CE indicator prototype (CEIP) (Cayzer et al., 2017), Circularity Potential Indicator (CPI) (Saidani et al., 2017)
R4	Repair	MCI, PCI, LI (utility X takes into account the product's lifetime compared to the industry average)	Accessibility Index (Soh et al., 2015), Time for Battery Changing, Reversible Joints, Tools for Disassembling (Cerdan et al., 2009), Disassembly Effort Index (Das et al., 2000), Disassembly Depth (DIN 45554), Disassembly Depth Effectiveness (Giudice & Kassem, 2009), CE indicator prototype (CEIP) (Cayzer et al., 2017), Circularity Potential Indicator (CPI) (Saidani et al., 2017)
R5	Re-furbish	-	End of Life Index (Lee et al., 2014), Accessibility Index (Soh et al., 2015), Time for battery Changing, Parts with label, Reversible Joints, Tools for Disassembling (Cerdan et al., 2009), Disassembly Effort Index (Das et al., 2000), Disassembly Depth (DIN 45554), Disassembly Depth Effectiveness (Giudice & Kassem, 2009), Material Efficiency Metric (Brandström & Eriksson, 2022), Product Upgradability Index (Xing & Belusko, 2008), CE indicator prototype (CEIP) (Cayzer et al., 2017), Circularity Potential Indicator (CPI) (Saidani et al., 2017)
R6	Re-manu-facture	-	RRR Benefit Rate (Ardente & Mathieux, 2014), End of Life Index (Lee et al., 2014), Accessibility Index (Soh et al., 2015), Painted, Stained or Pigmented Surfaces, Laminated or Compound Materials, Parts with Label, Reversible Joints, Tools for Disassembling (Cerdan et al., 2009), Disassembly Effort Index (Das et al., 2000), Circular Economy Performance Indicator (Huysman et al., 2017), Disassembly Depth (DIN 45554), Disassembly Depth Effectiveness (Giudice & Kassem, 2009), Recycling Desirability Index (can be applied on remanufacturing instead of recycling, Sultan et al. 2017), CE indicator prototype (CEIP) (Cayzer et al., 2017), Circularity Potential Indicator (CPI) (Saidani et al., 2017)
R7	Repur-pose	-	-



R8	Re-cycle	MCI, PCI, LI (recycled material), Recycling Rate (DIN 45555), Share of Recycled Material (DIN 45557), Average percent recycled content of an inflow (X) (ISO 59020:2024), Average percent recycled content of an inflow (X), Actual % recycling rate of outflow (X) (ISO 59020:2024)	Circular-process Waste Factor (Lokesh et al., 2020), Material Efficiency Metric (Brandström & Eriksson, 2022), Material Reutilization Score (MRS) (Cradle to Cradle Products Innovation Institute, 2016), Circular Economy Index (CEI) (Di Maio & Rem, 2015), CE indicator prototype (CEIP) (Cayzer et al., 2017), Circular Economy Performance Indicator (CPI) (Huysman et al., 2017), Circularity Index (CI) (Carmona et al., 2024), Circularity Potential Indicator (CPI) (Saidani et al., 2017)
R9	Re-cover	MCI, PCI, LI (material going to energy recovery), Energy Efficiency (Patterson et al., 1996)	Circular-process Energy Intensity (Lokesh et al., 2020), CE indicator prototype (CEIP) (Cayzer et al., 2017), Circular Economy Performance Indicator (CPI) (Huysman et al., 2017)



9.2 Anhang B

Tabelle 17: Auflistung verwandter Studien und der verwendeten Allokationsmethoden

Referenz	Übersicht	Allokationsansatz
Błażejowski et al. (2021)	Vergleichende Ökobilanz von wiederverwendbaren (Glas und Stahl) und Einweg-Milchbehältern (HDPE-Kunststoff), wobei beide Alternativen eine Mischung aus neuem und recyceltem Material sind und am Ende der Lebensdauer teilweise recycelt werden	Net scrap
Cottafava et al. (2021)	Ökobilanz von Mehrwegbechern im Vergleich zu Einwegbechern, um den Break-even-Punkt zu ermitteln (ausgehend von den Rohstoffen und einschließlich Recycling und Energierückgewinnung)	Avoided Burden
EU JRC (2015)	Cradle-to-Grave-LCA eines manuellen Geschirrspülers für EU-Umweltzeichen-Kriterien	Cut-off
Hallberg et al. (2023)	Ökobilanz von industriellen Kunststoffverpackungen (Modell für geschlossenen Kreislauf, offenen Kreislauf und deren Kombination vorgestellt)	Systemerweiterung, Net scrap
Hermansson et al. (2022)	Ökobilanz des Recyclings von Kohlenstofffaserverbundwerkstoffen	Cut-off, Avoided Burden und CFF
Horodytska et al. (2020)	Ökobilanz zum Upcycling von bedruckten Kunststofffolien	Avoided Burden
Kröhnert and Stucki (2021)	Ökobilanz eines Shampoos auf pflanzlicher Basis auf dem Schweizer Markt unter Berücksichtigung von Nachfüloptionen (Fokus auf den Lebenszyklus des Shampoos und die Entsorgung der Verpackung, ohne Kredit oder Belastung)	Cut-off
Nessi et al. (2020)	LCA alternativer Methoden zur Kunststoffherstellung	CFF
Navarro et al. (2018)	Untersuchung des Einflusses der Verpackung (Glas, Dose oder PE) auf die Ökobilanz eines nativen Olivenölprodukts in Spanien	Systemerweiterung
Papo and Corona (2022)	Vergleichende Ökobilanz einer HDPE-Flasche für Nicht-Getränke (lineares vs. zirkuläres Modell)	Systemerweiterung
Tamoor et al. (2022)	Cradle-to-Cradle-LCA von PET-Verpackungen in China unter Berücksichtigung des gesamten Lebenszyklus von neuen Materialien bis hin zu verschiedenen Szenarien für das EOL	Keine Allokation
Thomassen et al. (2024)	Vergleichende Ökobilanz von Mehrweg- und Einweg-Reisverpackungen in Belgien (beide werden aus neuen Materialien hergestellt und am Ende der Lebensdauer recycelt)	Avoided Burden (Gutschrift für recyceltes Material)
van der Harst et al. (2014)	Vergleichende Ökobilanz von Einweg-Getränkebechern (Kunststoff, Biokunststoff und Papier)	Systemerweiterung



9.3 Anhang C

 Circularity Indicators _ The Advisor <i>Target the Right C-Indicators</i>		Inputs - Filtering Selection Criteria
↑↑↑↑↑↑↑↑↑↑		
- Instruction - 1/ Fill in the yellow cells that can be scrolled, as a filter to identify the most suitable circularity tool(s)/indicator(s) to your needs ↓↓↓ 2/ Click on the logo above to launch the search and have access to your personalised inventory of circularity tools/indicators. ↑↑↑ N.B. You can leave one or several criteria blank to have access to a wider variety of proposed solutions.		
↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓		
Circular Economy Implementation Level Are you focused on the circularity of a component, products, materials (micro), of an industrial symbiosis, eco-park, value chain (meso), of a region or nation (macro) ?		Micro
↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓		
Circularity Perspective (Retro- or Pro-) Are you interested in knowing actual and effective circularity performances (retrospective) or potential performances of circular practices e.g. during product development (prospective) ?		Actual (effective)
↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓		
Circularity Performance Are you willing to evaluate the intrinsic performance of your circularity loops (recirculation of resources) or the impacts/consequences of circular practices on the sustainability performance ?		Intrinsic
↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓		
Circularity Loop Are you considering a particular loop/class of the circular economy (i.e. Maintain & Prolong; Reman. & Reuse; Recycle) ?		All the Loops
↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓		
Dimensionality Are you looking for more particularly for a tool with a single and unique indicator or for a framework including a set of multiple indicators ?		Single Indicator
↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓		
Usages & Purposes Are you using indicators for information, action, communication, or learning purposes? Please keep in mind that a same set of C-indicators can be used for different purposes.		Communication
↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓		
Transversality Are you looking for generic tool(s)/indicator(s) that could be applied for a wide variety of products/organizations or for more specific ones designed for a particular industrial field ?		Generic
↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓		
Type & Format What kind of assessment framework linked to the C-indicators would you prefer to use ?		

Abbildung 36: Excel-Tool und Auswahlkriterien für CE-Indikatoren für das Fallbeispiel Spülmittelkonzentrat (Saidani et al., 2019)



9.4 Anhang D

Tabelle 18: Übersicht einiger CE und Zirkularitätsbewertungen im Kunststoff und Verpackungssektor

Autor & Jahr	Übersicht	CE-Indikatoren
Nicro und Kalbar (2019)	Rahmenwerk für die Auswahl von CE-Indikatoren mit Lebenszyklusperspektive; Fallstudie zur Bierindustrie	MRS, MCI
Sazdovski et al. (2024)	Vergleichende Studie über Sekundärverpackungen von frischen Lebensmitteln in Spanien; Einwegkarton gegenüber Mehrwegkisten	MCI, PCI
Roos Lindgreen et al. (2021)	CE-Indikatoren Übersicht für Glas- und PET-Flaschen aus der grauen Literatur	MCI, MRS, RESCOM, UL3600, CTI
Lonca et al. (2020)	Strategien für closed-loop Recycling im PET-Sektor in den USA	MCI
Chairat und Gheewala (2023)	C-LCA des open und closed-loop Recyclings; PET Bottle-to-Bottle vs. Bottle-to-Fiber	MCI
Vadoudi et al. (2022)	C-LCA von mehrschichtigen Kunststoffverpackungen	Eine modifizierte Version von MCI
Matos et al. (2024)	Überprüfung von Indikatoren und Taxonomie zur Verwendung in CE und Ökodesign	MCI, CEIP, VRE
Karayılan et al. (2021)	Anwendung von CE-Ansätzen zur Minimierung der Umweltauswirkungen im Bereich der Kunststoffverpackungen	MCI
Tashkeel et al. (2021)	Ökonomisch basierte CE-Bewertung von Leichtverpackungsabfällen (LVP)	Eine kostennormierte Version des MCI
Pauer et al. (2019)	Empfehlung von eindimensional kategorisierten CE-Indikatoren für Lebensmittelverpackungen: Input/Output/Energie	Rezyklateinsatz, Wiederverwendungsrate, etc.
Gonçalves et al. (2024)	CE-Analyse und MFA im portugiesischen LVP-Sektor	Eine modifizierte Version von MCI
Thomassen et al. (2024)	Vergleichende C-LCA von Mehrweg- und Einweg-Reisverpackungen	Pauer et al. (2019) Indikatoren, MCI
Matos et al. (2023)	Klassifizierung von 30 CE-Indikatoren auf Mikroebene im Hinblick auf CE-Strategien und Identifizierung von relevanten Indikatoren für den Kunststoffverpackungssektor	MCI, PCI, VRE, CPI, SCI, TRP, CEI, GRI, PLCM
Syu et al. (2022)	CE-Bewertung von Lebensmittelqualität-Kunststoffen	MRS, CEV, PLCM, MRI, MCI
Rasines et al. (2024)	C-LCA von Frischobstverpackungen; wiederverwendbare gegenüber Einwegkisten	MCI, MRS, CI
Šuskevičė und Kruopienė (2020)	Modelle zur Wiederverwendung von Festival-Getränkebechern und CE-Auswirkungen	MCI



9.5 Anhang E

Tabelle 19: Inputparamete, Variablen, Endergebnisse der MCI-Berechnung für die Produktkombination für die Funktionelle Einheit von 180 gewaschenen PS (fünf Nachfüllvorgänge)

Parameter Definition (EMF, 2015)		Einheit	Konventionelles Spülmittel			Spülmittelkonzentrat
			PET Flasche	HDPE Deckel	PP Label	LDPE Pouch
M	Produktmasse	g	4,2	0,5	0,1	4,0
F _r	Anteil der Produktmasse aus rezykliertem Material	%	75	-	-	-
C _r	Anteil der Produktmasse, der für das Recycling gesammelt wird	%	70	70	70	70
E _c	Effizienz des Recyclingprozesses	%	63	67	74	70
E _f	Effizienz des Recyclingprozesses zur Rohstoffproduktion für das Produkt	%	63	-	-	-
L	tatsächliche durchschnittliche Lebensdauer des Produkts	Monat	1	1	1	5/6
L _{av}	Industriedurchschnittliche Lebensdauer des Produkts	Monat	1/6	1/6	1/6	5/6
U	tatsächliche durchschnittliche Anzahl erreichter Funktioneller Einheiten während der Produktnutzungsphase	-	1/6	1/6	1/6	5/6
U _{av}	Industriedurchschnittliche Anzahl erreichter Funktioneller Einheiten während der Produktnutzungsphase	-	1/6	1/6	1/6	5/6
V	Masse der zugeführten Materialien, die nicht aus Recycling, Wiederverwendung oder nachhaltiger Produktion stammen	g	1,05	0,53	0,13	4
W ₀	nicht verwertbarer Abfall aus Produktmaterial (zur Deponierung etc.)	g	1,26	0,16	0,04	1,20
W _c	nicht verwertbarer Abfall aus Recyclingprozess	g	1,09	0,12	0,02	0,84
W _f	Masse an nicht verwertbarem Abfall zur Herstellung von rezykliertem Ausgangsmaterial für das Produkt	g	1,85	0,00	0,00	0,00
W	Gesamtmasse nicht verwertbarer Abfall	g	2,73	0,22	0,05	1,62
X	Utility (dt. Nutzen)	-	6,00	6,00	6,00	1,00
F(X)	Utility factor	-	0,15	0,15	0,15	0,90



LFI	Linear flow index (Komponenten)	–	0,43	0,75	0,73	0,74
MCLi	Material Circularity Index (Komponenten)	–	0,94	0,89	0,89	0,33
MCL_{tot}	Material Circularity Index (gesamt)	–	0,66			

Tabelle 20: Inputparamete, Variablen, Endergebnisse der MCI-Berechnung der Spülmittelflasche mit verschiedenen Rezyklatanteilen (50 % und 100 %) für die Funktionelle Einheit von 180 gewaschenen PS (fünf Nachfüllvorgänge)

Parameter Definition (EMF, 2015)		Einheit	Konventionelles Spülmittel		
			PET Flasche	HDPE Deckel	PP Label
M	Produktmasse	g	25,2	3,2	0,8
F _r	Anteil der Produktmasse aus rezykliertem Material	%	50 100	-	-
C _r	Anteil der Produktmasse, der für das Recycling gesammelt wird	%	70	70	70
E _c	Effizienz des Recyclingprozesses	%	63	67	74
E _f	Effizienz des Recyclingprozesses zur Rohstoffproduktion für das Produkt	%	63	-	-
L	tatsächliche durchschnittliche Lebensdauer des Produkts	Monat	1	1	1
L _{av}	Industriedurchschnittliche Lebensdauer des Produkts	Monat	1	1	1
U	tatsächliche durchschnittliche Anzahl erreichter Funktioneller Einheiten während der Produktnutzungsphase	–	1	1	1
U _{av}	Industriedurchschnittliche Anzahl erreichter Funktioneller Einheiten während der Produktnutzungsphase	–	1	1	1
V	Masse der zugeführten Materialien, die nicht aus Recycling, Wiederverwendung oder nachhaltiger Produktion stammen	g	12,60 0	3,20	0,80
W ₀	nicht verwertbarer Abfall aus Produktmaterial (zur Deponierung etc.)	g	7,56	0,96	0,24
W _c	nicht verwertbarer Abfall aus Recyclingprozess	g	6,53	0,74	0,15
W _f	Masse an nicht verwertbarem Abfall zur Herstellung von rezykliertem Ausgangsmaterial für das Produkt	g	7,40 14,80	0,00	0,00
W	Gesamtmasse nicht verwertbarer Abfall	g	14,52 18,22	1,33	0,31



X	Utility (dt. Nutzen)	–	1,00	1,00	1,00
F(X)	Utility factor	–	0,90	0,90	0,90
LFI	Linear flow index (Komponenten)	–	0,53 0,33	0,75	0,73
MCLI	Material Circularity Index (Komponenten)	–	0,52 0,70	0,32	0,34
MCI _{tot}	Material Circularity Index (gesamt)	–	0,49 0,65		



10 Literaturverzeichnis

- Agudo, F. L., Bezerra, B. S. & Gobbo Júnior, J. A. (2023). An overview of Brazilian companies' readiness to implement industrial symbiosis. *Business Strategy and the Environment*, 33(2), 1066–1080.
- Ahmed, A. A., Nazzal, M. A., Darras, B. M. & Deiab, I. M. (2022a). A comprehensive multi-level circular economy assessment framework. *Sustainable Production and Consumption*, 32, 700–717. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2022.05.025>
- Ahmed, A. A., Nazzal, M. A., Darras, B. M. & Deiab, I. M. (2022b). A comprehensive multi-level circular economy assessment framework. *Sustainable Production and Consumption*, 32, 700–717. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2022.05.025>
- Anastasiades, K., Blom, J., Buyle, M. & Audenaert, A. (2020). Translating the circular economy to bridge construction: Lessons learnt from a critical literature review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 117, 109522. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109522>
- Araujo, J. B., Nolte, A., Berg, H., Dittrich, M., Greiff, K., Plociennik, C., Pomp, A. & Viere, T. (2025). A Typology for Circular Economy Data. *Journal of Circular Economy*. <https://doi.org/10.55845/UXBM6358>
- Ardente, F. & Mathieux, F. (2014). Identification and assessment of product's measures to improve resource efficiency: the case-study of an Energy using Product. *Journal of Cleaner Production*, 83, 126–141. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.07.058>
- Azuaje, I., Gonzalez, R., Ekvall, T., Gaudreault, C., Dessbesell, L., Tu, Q. & Lizundia, E. (2025). Global discussion on life cycle assessment allocation methods for recycled fibers. *BioResources*, 20(2), 2459–2463. <https://doi.org/10.15376/biores.20.2.2459-2463>
- Barastas, S. G., Pistikopoulos, E. N. & Avraamidou, S. (2022). A quantitative and holistic circular economy assessment framework at the micro level. *Computers & Chemical Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2022.107697>
- Barreiro-Gen, M. & Lozano, R. (2020). How circular is the circular economy? Analysing the implementation of circular economy in organisations. *Business Strategy and the Environment*, 29(8), 3484–3494. <https://doi.org/10.1002/bse.2590>
- BASF. (2025). *BASF Group Annual Report 2024*. https://report.basf.com/2024/en/_assets/downloads/entire-full-report-basf-ar24.pdf?h=bgn5lq-l
- The Battery Pass consortium (2023). Comparison of end-of-life allocation approaches: An analysis complementing the Battery Pass Rules for calculating the Carbon Footprint of the 'End-of-life and recycling' life cycle stage.
- Bayram, B., Deserno, L. & Greiff, K. (2024). Product Quality in the Circular Economy: A Systematic Review of its Definition and Contexts in Scientific Literature. *Circular Economy and Sustainability*, 4(4), 2713–2747. <https://doi.org/10.1007/s43615-024-00396-0>
- Bergsma, G. & Sevenster, M. (2013). Allocating recycling benefits in LCA of metals.
- Bezerra de Araujo, J. & Viere, T. (2025). *Reference List of Micro-Level Circular Economy Indicators*. <https://zenodo.org/records/15058287>
- Błażejowski, T., Walker, S. R. J., Muazu, R. I. & Rothman, R. H. (2021). Reimagining the milk supply chain: Reusable vessels for bulk delivery. *Sustainable Production and Consumption*, 27, 1030–1046. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.02.030>
- BMUKN. (2024). *Nationale Kreislaufwirtschaftsstrategie*. <https://www.bundesumweltministerium.de/download/nationale-kreislaufwirtschaftsstrategie-nkws>



- BMWE. (2025). *Unsere Energiewende_ sicher, sauber, bezahlbar*.
- Bocken, N. M. P., Pauw, I. de, Bakker, C. & van der Grinten, B. (2016). Product design and business model strategies for a circular economy. *Journal of Industrial and Production Engineering*, 33(5), 308–320. <https://doi.org/10.1080/21681015.2016.1172124>
- Bracquené, E., Dewulf, W. & Duflou, J. R. (2020). Measuring the performance of more circular complex product supply chains. *Resources, Conservation and Recycling*, 154, 104608. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104608>
- Brandström, J. & Eriksson, O. (2022). How circular is a value chain? Proposing a Material Efficiency Metric to evaluate business models. *Journal of Cleaner Production*. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130973>
- Bulach, W., Dehoust, G., Mayer, F. & M ck, A. (2022).  kobilanz zu den Leistungen der dualen Systeme im Bereich des Verpackungsrecyclings.
- KrWG (2012). <https://www.gesetze-im-internet.de/krwg/>
- Bundesumweltministeriums. (2025, 31. Juli). *Nationale Kreislaufwirtschaftsstrategie (NKWS)*. <https://www.bundesumweltministerium.de/themen/kreislaufwirtschaft/kreislaufwirtschaftsstrategie>
- Cagno, E., Negri, M., Neri, A. & Giambone, M. (2023). One Framework to Rule Them All: An Integrated, Multi-level and Scalable Performance Measurement Framework of Sustainability, Circular Economy and Industrial Symbiosis. *Sustainable Production and Consumption*, 35, 55–71. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2022.10.016>
- Carmona, L. G., Whiting, K. & Cullen, J. (2024). Circularity Index: Performance Assessment of a Low-Carbon and Circular Economy. In *Technology Innovation for the Circular Economy* (S. 17–28). John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/9781394214297.ch2>
- Cayzer, S., Griffiths, P. & Beghetto, V. (2017). Design of indicators for measuring product performance in the circular economy. *International Journal of Sustainable Engineering*, 10(4-5), 289–298. <https://doi.org/10.1080/19397038.2017.1333543>
- Cerdan, C., Gazulla, C., Raugei, M., Martinez, E. & Fullana-i-Palmer, P. (2009). Proposal for new quantitative eco-design indicators: a first case study. *Journal of Cleaner Production*, 17(18), 1638–1643. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2009.07.010>
- Corona, B., Shen, L., Reike, D., Rosales Carre n, J. & Worrell, E. (2019). Towards sustainable development through the circular economy—A review and critical assessment on current circularity metrics. *Resources, Conservation and Recycling*, 151, 104498. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104498>
- Covestro. (2025). *Annual Report 2024*. <https://annualreport.covestro.com/annual-financial-report-2024/en/collect/>
- Das, S. K., Yedlarajiah, P. & Narendra, R. (2000). An approach for estimating the end-of-life product disassembly effort and cost. *International Journal of Production Research*, 38(3), 657–673. <https://doi.org/10.1080/002075400189356>
- Di Maio, F. & Rem, P. C. (2015). A Robust Indicator for Promoting Circular Economy through Recycling. *Journal of Environmental Protection*, 06(10), 1095–1104. <https://doi.org/10.4236/jep.2015.610096>
- Ekvall, T., Björklund, A., Sandin, G. & Jelse, K. (2020). Modeling recycling in life cycle assessment.
- EMF. (2013). *Towards the circular economy*. http://emf.s3.amazonaws.com/downloads/towards_a_circular_economy.pdf
- EMF & Granta. (2019). *Material Circularity Indicator (MCI)*. <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/material-circularity-indicator>
- EU JRC. (2019). *Suggestions for updating the organisation environmental footprint (OEF) method*. Publications Office. <https://doi.org/10.2760/424613>



- EU JRC. (2022). *Understanding Product Environmental Footprint and Organisation Environmental Footprint methods*.
- European Financial Reporting Advisory Group. EFRAG IG 3 List of ESRS Data Points - Explanatory Note, 2024.
<https://www.efrag.org/sites/default/files/sites/webpublishing/SiteAssets/EFRAG%20IG%20%20List%20of%20ESRS%20Data%20Points%20-%20Explanatory%20Note.pdf>
- Eurostat. (2018). *Circular material use rate: Calculation method : 2018 edition* (2018 edition). Publications Office. <https://ec.europa.eu/eurostat/documents/3859598/9407565/KS-FT-18-009-EN-N.pdf/b8efd42b-b1b8-41ea-aaa0-45e127ad2e3f?t=1543310039000>
<https://doi.org/10.2785/132630>
- Eurostat. (2024). *Patents related to recycling and secondary raw materials*.
https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/cei_cie020__custom_6107747/bookmark/table?lang=en&bookmarkId=97a2d688-b1ac-4b66-a9ae-0bc787460db7
- Eurostat. (2025a). *Beschäftigte in Sektoren der Kreislaufwirtschaft*.
https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/cei_cie011__custom_6101297/bookmark/table?lang=de&bookmarkId=2c809d6c-cb60-464a-b404-dabcae6a01d2
- Eurostat. (2025b). *Circular Economy Monitoring Framework*.
<https://ec.europa.eu/eurostat/web/circular-economy/monitoring-framework>
- Evans & Bocken, N. (2013). *Circular Economy Toolkit*. Cambridge Institute for Manufacturing.
<http://circulareconomytoolkit.org/>
- Fairphone (2024). Impact Report 2023. <https://www.fairphone.com/wp-content/uploads/2024/06/Impact-Report-2023-press-release-final.pdf#:~:text=The%20report%20measures%20the%20company%E2%80%99s%20impact%20performance%20by,of%20sustainability,%20the%20Fairphone%205%20and%20Fairbuds%20XL>
- Ferrante, M., Vitti, M. & Sassanelli, C [C.] (2025). The evolution of circular economy performance assessment: A systematic literature review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 217, 115757. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.115757>
- Finnveden, G., Hauschild, M. Z., Ekvall, T., Guinée, J., Heijungs, R., Hellweg, S., Koehler, A., Pennington, D. & Suh, S. (2009). Recent developments in Life Cycle Assessment. *Journal of environmental management*, 91(1), 1–21. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2009.06.018>
- Fraccascia, L. & Giannoccaro, I. (2020). What, where, and how measuring industrial symbiosis: A reasoned taxonomy of relevant indicators. *Resources, Conservation and Recycling*, 157, 104799. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104799>
- Franco, N. G., Almeida, M. F. L. & Calili, R. F. (2021). A strategic measurement framework to monitor and evaluate circularity performance in organizations from a transition perspective. *Sustainable Production and Consumption*, 27, 1165–1182.
<https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.02.017>
- Franklin-Johnson, E., Figge, F. & Canning, L. (2016). Resource duration as a managerial indicator for Circular Economy performance. *Journal of Cleaner Production*, 133, 589–598.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.05.023>
- Frischknecht, R. (2010). LCI modelling approaches applied on recycling of materials in view of environmental sustainability, risk perception and eco-efficiency. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 15(7), 666–671. <https://doi.org/10.1007/s11367-010-0201-6>
- Geng, Y., Fu, J., Sarkis, J. & Xue, B. (2012). Towards a national circular economy indicator system in China: an evaluation and critical analysis. *Journal of Cleaner Production*, 23(1), 216–224.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.07.005>



- Giudice, F. & Kassem, M. (2009). End-of-life impact reduction through analysis and redistribution of disassembly depth: A case study in electronic device redesign. *Computers & Industrial Engineering*, 57(3), 677–690. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2009.01.007>
- Golsteijn, L., Menkveld, R., King, H., Schneider, C., Schowanek, D. & Nissen, S. (2015). A compilation of life cycle studies for six household detergent product categories in Europe: the basis for product-specific A.I.S.E. Charter Advanced Sustainability Profiles. *Environmental Sciences Europe*, 27(1). <https://doi.org/10.1186/s12302-015-0055-4>
- Gonçalves, M., Freire, F. & Garcia, R. (2024). Material flow analysis and circularity assessment of plastic packaging: An application to Portugal. *Resources, Conservation and Recycling*, 209, 107795. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2024.107795>
- GRI. (2024). *Consolidated Set of the GRI Standards*. <https://www.globalreporting.org/standards>
- Hatzfeld, T., Backes, J. G., Guenther, E. & Traverso, M. (2022). Modeling circularity as Functionality Over Use-Time to reflect on circularity indicator challenges and identify new indicators for the circular economy. *Journal of Cleaner Production*, 379, 134797. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134797>
- Hauschild, M. Z., Rosenbaum, R. K. & Olsen, S. I. (2018). *Life Cycle Assessment*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-56475-3>
- Henkel AG & Co. KGaA. *Henkel Sustainability Report 2024*. <https://www.henkel.com/resource/blob/2043310/8e58944556950ebb78141bf6a86b58a9/d/ata/2024-sustainability-report.pdf>
- Hermansson, F., Ekvall, T., Janssen, M. & Svanström, M. (2022). Allocation in recycling of composites - the case of life cycle assessment of products from carbon fiber composites. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 27(3), 419–432. <https://doi.org/10.1007/s11367-022-02039-8>
- Huang, B., Yong, G., Zhao, J., Domenech, T., Liu, Z., Chiu, S. F., McDowall, W., Bleischwitz, R., Liu, J. & Yao, Y. (2019). Review of the development of China's Eco-industrial Park standard system. *Resources, Conservation and Recycling*, 140, 137–144.
- Huijbregts et al., M. (2016). ReCiPe 2016: A harmonized life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level Report I: Characterization.
- Huysman, S., Sala, S., Mancini, L., Ardente, F., Alvarenga, R. A., Meester, S. de, Mathieux, F. & Dewulf, J. (2015). Toward a systematized framework for resource efficiency indicators. *Resources, Conservation and Recycling*, 95, 68–76. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2014.10.014>
- Huysman, S., Schaepmeester, J. de, Ragaert, K., Dewulf, J. & Meester, S. de (2017). Performance indicators for a circular economy: A case study on post-industrial plastic waste. *Resources, Conservation and Recycling*, 120, 46–54. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.01.013>
- International Financial Reporting Standards. (2024). *SASB Standards*. <https://www.ifrs.org/issued-standards/sasb-standards/>
- International Organization for Standardization (ISO) (2021a). *Environmental management – Life cycle assessment – Requirements and guidelines* (DIN EN ISO 14044).
- International Organization for Standardization (ISO) (2021b). *Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen: (ISO 14040:2006 + Amd 1:2020); Deutsche Fassung EN ISO 14040:2006 + A1:2020* (DIN EN ISO 14040).
- International Organization for Standardization (ISO) (2024a). *Circular economy — Measuring and assessing circularity* (ISO 59020:2024).
- International Organization for Standardization (ISO) (2024b). *Circular economy — Vocabulary, principles and guidance for implementation* (ISO 59004:2024). <https://www.iso.org/standard/80648.html>



- Janik, A. & Ryszko, A. (2019). Circular economy in companies: an analysis of selected indicators from a managerial perspective. *Multidisciplinary Aspects of Production Engineering*, 2(1), 523–535. <https://doi.org/10.2478/mape-2019-0053>
- Kaplan, R. S. & Norton, D. P. (1992). *The balanced scorecard: measures that drive performance*. <https://jobs.skillbeeglobal.com/public/resource-center/organization-and-strategy/balanced%20scorecard-kaplan.pdf>
- Karayılan, S., Yılmaz, Ö., Uysal, Ç. & Naneci, S. (2021). Prospective evaluation of circular economy practices within plastic packaging value chain through optimization of life cycle impacts and circularity. *Resources, Conservation and Recycling*, 173, 105691. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105691>
- Kim, B.-S., Shah, B., He, T. & Kim, K.-I. (2022). A survey on analytical models for dynamic resource management in wireless body area networks. *Ad Hoc Networks*, 135, 102936. <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2022.102936>
- Kirchherr, J., Reike, D. & Hekkert, M. (2017). Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. *Resources, Conservation and Recycling*, 127, 221–232. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.005>
- Klotz, M. (2023). Design and Environmental Impact Assessment of a Circular Plastics Material Flow System.
- Koch, Tomasin, Lolli, Butturi & Sellitto (2022). Performance Assessment of an Eco-Industrial Park: a Strategic Tool to Help Recovering Energy and Industrial Waste.
- Kosmol, L., Maiwald, M., Pieper, C., Plötz, J. & Schmidt, T. (2021). An indicator-based method supporting assessment and decision-making of potential by-product exchanges in industrial symbiosis. *Journal of Cleaner Production*, 289, 125593. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125593>
- Kristensen, H. S. & Mosgaard, M. A. (2020). A review of micro level indicators for a circular economy – moving away from the three dimensions of sustainability? *Journal of Cleaner Production*, 243, 118531. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118531>
- Kurilova-Palisaitiene, J., Matschewsky, J. & Sundin, E. (2024). Four Levels of Remanufacturing Maturity as a Circular Manufacturing Indicator: A Theoretical Framework and Practical Assessment Tool. *Resources, Conservation and Recycling*, 211, 107899. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2024.107899>
- Lee, H. M., Lu, W. F. & Song, B. (2014). A framework for assessing product End-Of-Life performance: reviewing the state of the art and proposing an innovative approach using an End-of-Life Index. *Journal of Cleaner Production*, 66, 355–371. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.11.001>
- Linder, M., Sarasini, S. & van Loon, P. (2017). A Metric for Quantifying Product-Level Circularity. *Journal of Industrial Ecology*, 21(3), 545–558. <https://doi.org/10.1111/jiec.12552>
- Lokesh, K., Matharu, A. S., Kookos, I. K., Ladakis, D., Koutinas, A., Morone, P. & Clark, J. (2020). Hybridised sustainability metrics for use in life cycle assessment of bio-based products: resource efficiency and circularity. *Green Chemistry*, 22(3), 803–813. <https://doi.org/10.1039/C9GC02992C>
- Luthin, A., Traverso, M. & Crawford, R. H. (2023). Circular life cycle sustainability assessment: An integrated framework. *Journal of Industrial Ecology*, 28(1), 41–58. <https://doi.org/10.1111/jiec.13446>
- Massari, G. F. & Giannoccaro, I. (2023). Adopting GRI Standards for the Circular Economy strategies disclosure: the case of Italy. *Sustainability Accounting, Management and Policy Journal*, 14(4), 660–694. <https://doi.org/10.1108/SAMPJ-07-2021-0284>



- Moraga, G., Huysfeld, S., Mathieux, F., Blegini, G. A., Alaerts, L., van Acker, K., Meester, S. de & Dewulf, J. (2019). Circular economy indicators: What do they measure? *Resources, Conservation and Recycling*, 452–461. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.03.045>
- Neely, A., Mills, J., Platts, K., Richards, H., Gregory, M., Bourne, M. & Kennerley, M. (2000). Performance measurement system design: developing and testing a process-based approach. *International Journal of Operations & Production Management*, 660–694.
- Obrecht, T. P., Jordan, S., Legat, A., Saade, M. R. M. & Passer, A. (2022). Development of an advanced methodology for assessing the environmental impacts of refurbishments. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1078(1), 12103. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1078/1/012103>
- Oliveira, C. T. de, Dantas, T. E. T. & Soares, S. R. (2021). Nano and micro level circular economy indicators: Assisting decision-makers in circularity assessments. *Sustainable Production and Consumption*, 26, 455–468. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2020.11.024>
- Papageorgiou, A., Henrysson, M., Nuur, C., Sinha, R., Sundberg, C. & Vanhuyse, F. (2021). Mapping and assessing indicator-based frameworks for monitoring circular economy development at the city-level. *Sustainable Cities and Society*, 75, 103378. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103378>
- Papo, M. & Corona, B. (2022). Life cycle sustainability assessment of non-beverage bottles made of recycled High Density Polyethylene. *Journal of Cleaner Production*, 378, 134442. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134442>
- Parchomenko, A., Nelen, D., Gillabel, J. & Rechberger, H. (2019). Measuring the circular economy - A Multiple Correspondence Analysis of 63 metrics. *Journal of Cleaner Production*, 210, 200–216. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.357>
- Pauliuk, S. (2018). Critical appraisal of the circular economy standard BS 8001:2017 and a dashboard of quantitative system indicators for its implementation in organizations. *Resources, Conservation and Recycling*, 129, 81–92. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.10.019>
- Pellengahr, F., Ghannadzadeh, A. & van der Meer, Y. (2023). How accurate is plastic end-of-life modeling in LCA? Investigating the main assumptions and deviations for the end-of-life management of plastic packaging. *Sustainable Production and Consumption*, 170–182. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2023.09.014>
- Potting, J., Hekkert, M., Worrell, E. & Hanemaaijer, A. (2017). Circular Economy: Measuring Innovation in the Product Chain.
- Psarommatis, F., May, G. & Azamfirei, V. (2025). Product reuse and repurpose in circular manufacturing: a critical review of key challenges, shortcomings and future directions. *Journal of Remanufacturing*. Vorab-Onlinepublikation. <https://doi.org/10.1007/s13243-025-00153-y>
- Purr, Günther, Lehrmann & Nuss. (2019). *Wege in eine ressourcenschonende Treibhausgasneutralität*. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/rescue_study_cc_36-2019_wege_in_eine_ressourcenschonende_treibhausgasneutralitaet_aufgabe2_juni-2021.pdf
- Rigamonti, L. & Mancini, E. (2021). Life cycle assessment and circularity indicators. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 26(10), 1937–1942. <https://doi.org/10.1007/s11367-021-01966-2>
- Rincón-Moreno, J., Ormazábal, M., Álvarez, M. J. & Jaca, C. (2021). Advancing circular economy performance indicators and their application in Spanish companies. *Journal of Cleaner Production*, 279, 123605. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123605>



- Ritthoff, M., Rohn, H. & Liedtke, C. (2002). *Calculating MIPS: Resource productivity of products and services* (Wuppertal Spezial 27e). Wuppertal: Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie. <https://www.econstor.eu/handle/10419/59294>
- Rossi, E., Bertassini, A. C., Ferreira, C. d. S., Neves do Amaral, W. A. & Ometto, A. R. (2020). Circular economy indicators for organizations considering sustainability and business models: Plastic, textile and electro-electronic cases. *Journal of Cleaner Production*, 247, 119137. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119137>
- Saidani, M., Yannou, B., Leroy, Y. & Cluzel, F. (2017). How to Assess Product Performance in the Circular Economy? Proposed Requirements for the Design of a Circularity Measurement Framework. *Recycling*, 2(1), 6. <https://doi.org/10.3390/recycling2010006>
- Saidani, M., Yannou, B., Leroy, Y., Cluzel, F. & Kendall, A. (2019). A taxonomy of circular economy indicators. *Journal of Cleaner Production*, 207, 542–559. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.014>
- Sassanelli, C [Claudio], Rosa, P., Rocca, R. & Terzi, S. (2019). Circular economy performance assessment methods: A systematic literature review. *Journal of Cleaner Production*, 229, 440–453. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.019>
- Soh, S. L., Ong, S. K. & Nee, A. (2015). Application of Design for Disassembly from Remanufacturing Perspective. *Procedia CIRP*, 26, 577–582. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.07.028>
- Stamminger, R., Elschenbroich, A., Rummler, B. & Broil, G. (2007). Washing-up Behaviour and Techniques in Europe.
- Statistisches Bundesamt. (2025a). *Abfallwirtschaft*. https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/Abfallwirtschaft/_inhalt.html
- Statistisches Bundesamt (2025b). Material- und Energieflüsse.
- Statistisches Bundesamt. (2025c). *Rohstoffe, Materialflüsse, Wasser*. https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/UGR/rohstoffe-materialfluesse-wasser/_inhalt.html
- Statistisches Bundesamt. (2025d). *Umweltökonomische Gesamtrechnungen*. https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/UGR/_inhalt.html
- Statistisches Bundesamt. (2025e, 25. Juni). *Statistischer Bericht - Abfallbilanz 2023*. <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/Abfallwirtschaft/Publikationen/Downloads-Abfallwirtschaft/statistischer-bericht-abfallbilanz-5321001237005.html>
- Sucozhañay, G., Vidal, I. & Vanegas, P. (2022). Towards a Model for Analyzing the Circular Economy in Ecuadorian Companies: A Conceptual Framework. *Sustainability*, 14(7), 4016. <https://doi.org/10.3390/su14074016>
- Suski, P. & Wiesen, K. (2016). Einsatz von Sekundärmaterial vs. recyclinggerechtes Design: Diskussion verschiedener End-of-Life-Allokationen unter Berücksichtigung der europäischen Abfallhierarchie. *uwf UmweltWirtschaftsForum*, 24(1), 7–13. <https://doi.org/10.1007/s00550-016-0395-6>
- Tashkeel, R., Rajarathnam, G. P., Wan, W., Soltani, B. & Abbas, A. (2021). Cost-Normalized Circular Economy Indicator and Its Application to Post-Consumer Plastic Packaging Waste. *Polymers*, 13(20). <https://doi.org/10.3390/polym13203456>
- Umweltbundesamt. (2019a). *Stoffstromorientierte Ermittlung des Beitrags der Sekundärrohstoffwirtschaft zur Schonung von Primärrohstoffen und Steigerung der Ressourcenproduktivität*. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/stoffstromorientierte-ermittlung-des-beitrags-der>



- Umweltbundesamt. (2019b). *Substitutionsquote: Ein realistischer Erfolgsmaßstab für die Kreislaufwirtschaft*. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/substitutionsquote-ein-realistischer>
- Umweltbundesamt. (2024). *Abfallaufkommen*. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/ressourcen-abfall/abfallaufkommen#deutschlands-abfall>
- Umweltbundesamt. (2025, 31. Juli). *Sekundärrohstoffwirtschaft: Gesamtergebnisse*. <https://www.umweltbundesamt.de/sekundaerrohstoffwirtschaft-gesamtergebnisse#tabellen-der-indikatoren-di-rec-und-derec>
- UNIDO. (2017). *Implementation Handbook for Eco-Industrial Parks*. <https://www.unido.org/learning-resources/implementation-handbook-eco-industrial-parks>
- United Nations. (2025). *System of Environmental Economic Accounting* |. <https://seea.un.org/>
- Vadoudi, K., Deckers, P., Demuytere, C., Askanian, H. & Verney, V. (2022). Comparing a material circularity indicator to life cycle assessment: The case of a three-layer plastic packaging. *Sustainable Production and Consumption*, 33, 820–830. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2022.08.004>
- Vlasopoulos, A., Malinauskaite, J., Żabnieńska-Góra, A. & Jouhara, H. (2023). Life cycle assessment of plastic waste and energy recovery. *Energy*, 277, 127576. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.127576>
- WBCSD (2021). Circular Transition Indicators v2.0 – Metrics for business, by business. <https://www.wbcd.org/resources/circular-transition-indicators-v2-0/?submitted=true>
- Webster, K. (2017). The circular economy : a wealth of flows. <https://cir.nii.ac.jp/crid/1130282270539850880>
- World Bank. (2021). *An international framework for eco-industrial parks: version 2.0*.
- Xing, K. & Belusko, M. (2008). Design for Upgradability Algorithm: Configuring Durable Products for Competitive Reutilization. *Journal of Mechanical Design*, 130(11), Artikel 111102. <https://doi.org/10.1115/1.2976446>
- Yilmaz, Yontem & Alkaya. (2016). *Industrial Symbiosis Indicators*.