Datenkompetenzzentrum für Circular Economy Daten

Gefördert durch:
Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt

Finanziert von der Europäischen Union
NextGenerationEU

Verfasser: Abdullah Farrukh

Meilenstein 3.3: Best-Practices zur Messung und Analyse von Kreislaufwirtschaft

Dissemination Level	PU (Public)
Abgabedatum	30.10.2026
Version	2.0.0
Autoren	Verantwortung: Farrukh, Abdullah (DFKI) Mitarbeit: • Araujo, Juliano • Nolte, Annalisa • Baumanns, Lara • Rezapour, Mahdi • Perau, Martin

Zusammenfassung

Die Kreislaufwirtschaft (Circular Economy, CE) gilt zunehmend als wirtschaftliche Notwendigkeit statt optionaler Strategie. Ihre erfolgreiche Umsetzung erfordert jedoch belastbare Daten, um bestehende CE-Prozesse messbar, vergleichbar und steuerbar zu machen. Der vorliegende Meilenstein 3.3 systematisiert zunächst die zentralen Herausforderungen einer datengetriebenen Kreislaufwirtschaft entlang sechs Kategorien: von der Datenbasis über Datenarchitektur, Methodik und Messung, Organisation und Fähigkeiten sowie ökonomische und strategische Unsicherheit bis hin zur Daten-Governance (Kapitel 2). Darauf aufbauend werden methodische Bausteine vorgestellt, die diesen Herausforderungen gezielt begegnen können, von strukturierter Datenmodellierung über die Etablierung harmonisierter Standards bis zum Kompetenzaufbau in Organisationen (Kapitel 3). Die praktische Anwendbarkeit dieser Methoden wird anhand zweier Best-Practices demonstriert: auf Produktebene anhand eines Ökobilanz- und Zirkularitätsvergleichs zweier Spülmittelverpackungen (Kapitel 4.1) sowie auf Unternehmensebene anhand eines mehrdimensionalen CE-Indikatorrahmens mit über 500 Indikatoren und einer strukturierten Datenextraktionspipeline (Kapitel 4.2). Beide Beispiele zeigen, wie die in Kapitel 2 identifizierten Datenherausforderungen mithilfe der in Kapitel 3 entwickelten Methoden adressiert werden können, und liefern damit Unternehmen, Forschung und politischen Akteuren konkrete Ansatzpunkte, um Zirkularität eigenständig zu messen, zu bewerten und datengetrieben zu steuern. Kapitel 5 fasst diese Ansatzpunkte zielgruppenspezifisch als Handlungsempfehlungen zusammen.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung 4
2 Herausforderungen der datengetriebenen CE 6
2.1 Datenbasis 7
2.2 Datenarchitektur und -integration 7
2.3 Methodik & Messung 7
2.4 Organisation & Fähigkeiten 8
2.5 Ökonomische und strategische Unsicherheit 8
2.6 Daten-Governance 8
2.7 Übergreifende Herausforderungen 9
3 Methoden & Vorgehensweise 10
3.1 Strukturierte Modellierung von CE-Daten 11
3.2 Systematische Aggregation und Operationalisierung von Daten 11
3.3 Identifikation von Zirkularitäts-Hotspots 11
3.4 Etablierung harmonisierter Rahmenwerke und Standards 11
3.5 Kompetenzentwicklung und Kapazitätsaufbau für eine datengetriebene Kreislaufwirtschaft 12
3.6 Systematische Integration heterogener Datenquellen 12
4 Best-Practices 14
4.1 Best-Practices für die Produktebene (Nano) 14
4.2 Best-Practices für die Unternehmensebene (Mikro) 18
5 Fazit und Handlungsempfehlungen 24
Literaturverzeichnis 27

1 Einleitung

Die Kreislaufwirtschaft (Circular Economy, CE) wird zunehmend zu einer strategischen Notwendigkeit. Aufgrund des zunehmenden globalen Wettbewerbs, der Ressourcenknappheit und des regulatorischen Drucks stehen insbesondere Unternehmen vor Herausforderungen, die ein Umdenken von der bisherigen linearen Wirtschaftsweise erfordern. Effiziente Ressourcennutzung, die Reduktion von Abfällen und die Verlängerung von Produktlebenszyklen sind nicht nur ökologische Zielsetzungen, sondern zunehmend auch mit ökonomischen Chancen und potenziellen Wettbewerbsvorteilen verbunden. Damit dieser Transformationsprozess gelingen kann, ist das Zusammenwirken unterschiedlicher Akteure erforderlich: Unternehmen müssen ihre Prozesse anpassen, Politik muss geeignete Rahmenbedingungen schaffen, Forschung baut die Wissensgrundlage auf und Verbraucher tragen zur Nachfrage bei (Organisation for Economic Co-operation and Development, 2024; European Commission, 2026)
.
Dieses Dokument untersucht, wie dieser Wandel durch Messung und Transparenz von existierenden (CE-) Prozessen gestützt werden kann und beantwortet somit die Frage:
Wie lassen sich die Zirkularität und Nachhaltigkeit bestehender (CE-) Prozesse und Maßnahmen bewerten, um deren ökologische und ökonomische Auswirkungen zu beurteilen?
Für eine belastbare Messung der CE sowie die Transparenz über die Funktionsweisen eines zirkulären Systems benötigt es Daten. Die steigende Komplexität globaler Wertschöpfungsketten führt zu einer zunehmenden Heterogenität von Daten. Unterschiedliche Akteure aus Industrie, Forschung und Regulierung stehen vor der Herausforderung, aus diesen Daten systematisch Wissen, Wertschöpfungspotenziale und Entscheidungsgrundlagen abzuleiten. Hierfür sind ausgeprägte Datenkompetenzen erforderlich. Deren Entwicklung, Anwendung und zielgruppengerechte Kommunikation bilden eine zentrale Voraussetzung für die Umsetzung einer strategisch und operativ wirksamen CE.
Das Ziel ist, konkrete Ansätze zur Messung der CE aufzuzeigen und datengetriebene CE-Maßnahmen anhand konkreter Beispiele zu demonstrieren. Der Fokus liegt dabei insbesondere auf Mess-, Analyse- und Datenmanagementansätzen, also auf der Frage, wie Zirkularität und Nachhaltigkeit belastbar bewertet werden können. Diese Fokussierung auf Transparenz und Bewertung bildet die Grundlage, auf der eine operative Umsetzung der CE aufbauen kann. Hierzu werden ausgewählte Anwendungsfälle sowie die dafür relevanten Datenkompetenzen in Form von Best-Practices dargestellt. Die erarbeiteten Best-Practices basieren auf folgender Definition:

Ein Best-Practice bezeichnet eine in der Praxis bewährte, erprobte und effektive Methode oder Vorgehensweise, die auf vergleichbare Anwendungsfälle übertragbar ist.

Im Kontext dieses Meilensteins bezieht sich der Begriff auf das Vorgehen bei der Messung und Analyse von Zirkularität und nicht auf die Wirksamkeit der jeweils betrachteten CE-Maßnahme selbst. „Bewährt“ bezieht sich dabei auf die eingesetzten Methoden, nicht auf die Häufigkeit des jeweils dargestellten Anwendungsfalls: Die im Folgenden gezeigten Vorgehensweisen bauen auf normierten beziehungsweise in Forschung und Praxis etablierten Verfahren auf. Als Best-Practice gilt in diesem Dokument somit ein Vorgehen, das (i) auf anerkannten Methoden beruht, (ii) nachvollziehbar dokumentiert ist und (iii) auf vergleichbare Anwendungsfälle übertragen werden kann.
Hierdurch sollen Unternehmen sowie weitere relevante Akteure dabei unterstützt werden, eigenständig bestehende (CE-) Prozesse zu messen, zu bewerten und datengetriebene Maßnahmen abzuleiten.

Das Dokument ist wie folgt strukturiert:
Kapitel 2 systematisiert die zentralen Herausforderungen einer datengetriebenen CE entlang sechs Kategorien, die von der Datenbasis bis zur Daten-Governance reichen und in Abbildung 2.1 zusammengeführt sind. Kapitel 3 stellt methodische Bausteine vor, die zur Bewältigung der zuvor genannten Herausforderungen eingesetzt werden können, und ordnet diese den jeweiligen Problemfeldern zu. Kapitel 4 überführt die methodischen Grundlagen auf Produkt- und Unternehmensebene anhand von zwei Best-Practice-Beispielen in praxisnahe Anwendungskontexte. Kapitel 5 fasst die gewonnenen Erkenntnisse zusammen und leitet daraus zielgruppenspezifische Handlungsempfehlungen für Unternehmen, Forschung sowie Politik und Standardisierung ab.

2 Herausforderungen der datengetriebenen CE

Aufbauend auf der zuvor skizzierten Zielsetzung, Kreislaufwirtschaft systematisch zu messen, ergibt sich, dass dies mit einer Vielzahl struktureller, technischer und organisatorischer Herausforderungen verbunden ist. Abbildung 2.1 führt diese im „Haus der CE-Daten-Herausforderungen“ zusammen und strukturiert sie entlang sechs Kategorien: der Datenbasis als Fundament, den vier Handlungsfeldern Datenarchitektur und -integration, Methodik und Messung, Organisation und Fähigkeiten sowie ökonomische und strategische Unsicherheit, und schließlich der Daten-Governance als übergreifendem Rahmen. Zwischen den Kategorien bestehen Wechselwirkungen, die über die jeweilige Zuordnung hinausreichen. Darüber hinaus bestehen übergreifende Herausforderungen, die mehrere Bereiche des dargestellten Bezugsrahmens betreffen und daher nicht einer einzelnen Kategorie zugeordnet werden können. Hierzu zählen insbesondere die Komplexität und Multidimensionalität von CE-Daten, potenzielle Zielkonflikte zwischen unterschiedlichen Zielgrößen sowie Herausforderungen bei der Identifikation relevanter Hotspots. Diese werden in Abbildung 2.1 entsprechend als kategorienübergreifende Aspekte dargestellt. Im Folgenden werden zunächst die einzelnen Kategorien und anschließend die übergreifenden Herausforderungen näher erläutert.

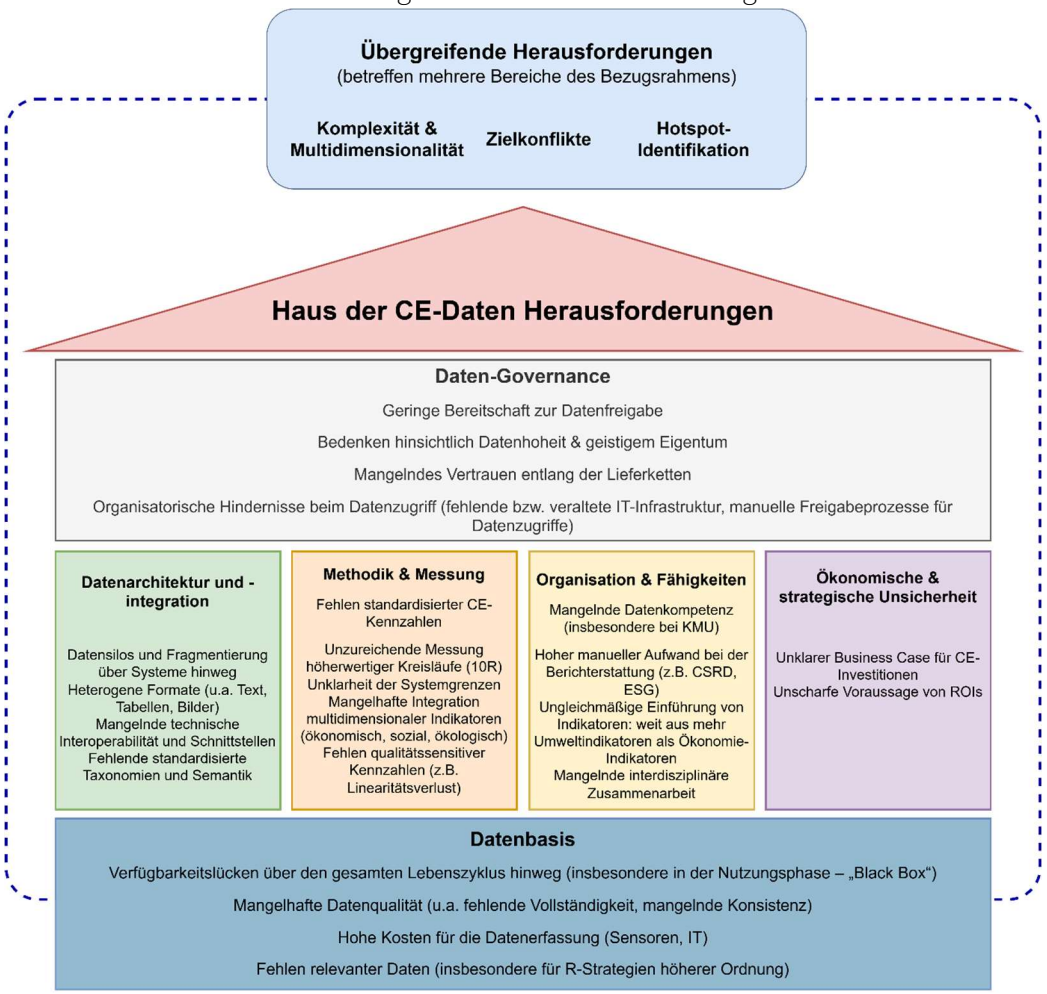

Abbildung 2.1: Haus der CE-Daten-Herausforderungen.

2.1 Datenbasis

Eine grundlegende Voraussetzung für datengetriebene CE-Ansätze ist die Verfügbarkeit geeigneter Daten entlang des gesamten Produktlebenszyklus. In der Praxis bestehen jedoch erhebliche Lücken, insbesondere in der Nutzungsphase, die häufig als „Black Box" fungiert und zu einem Informationsbruch zwischen Produktion und End-of-Life-Prozessen führt (Organisation for Economic Co-operation and Development, 2024; Pourrahimian, Seyedzadeh, Arabi, Kahani, & Lotfian, 2026). Viele für die CE relevanten Daten werden bislang nicht erhoben. Dies liegt entweder daran, dass diese technisch schwer messbar sind, oder weil ihre Bedeutung im CE-Kontext bisher nicht erkannt wird. Insbesondere Daten zu höherwertigen zirkulären Strategien (z. B. Refuse, Reuse, Repurpose) sind kaum verfügbar (Organisation for Economic Co-operation and Development, 2024). Darüber hinaus weisen vorhandene Daten häufig Qualitätsprobleme auf: Sie sind unvollständig, inkonsistent oder stammen aus unterschiedlichen, schwer vergleichbaren Quellen. Gleichzeitig erhöht die Datenfragmentierung die Kosten für die Bewertung und beeinträchtigt die Vergleichbarkeit zwischen Organisationen und Sektoren (Berg & Wilts, 2019). Denn die Erhebung und Bereitstellung qualitativ hochwertiger Daten ist oft mit Investitionen in Sensorik, IT-Infrastruktur oder Datenerfassungssysteme verbunden.

2.2 Datenarchitektur und -integration

Neben der Verfügbarkeit stellen die Strukturierung und Integration von Daten eine zentrale Herausforderung dar. CE-Daten entstehen in unterschiedlichen Systemen, etwa in Materialflussanalysen (MFA), Enterprise-Resource-Planning-Systemen (ERP), Lieferantendatenbanken oder Environmental, Social and Governance (ESG)-Plattformen (Elia, Gnoni, & Tornese, 2017; Pauliuk, Arvesen, Stadler, & Hertwich, 2017). Diese verteilte Datenlandschaft führt zu einer strukturellen Fragmentierung. Innerhalb von Organisationen verhindern isolierte Datensilos den notwendigen Informationsfluss. Gleichzeitig liegen Daten in heterogenen Formaten vor, beispielsweise von strukturierten Tabellen über Texte bis hin zu Bildern, was ihre Integration zusätzlich erschwert. Unterschiedliche Einheiten (z. B. Masse, Energie, monetäre Werte, Zeit) spiegeln die multidimensionale Natur von CE-Daten wider, erschweren jedoch Aggregation, Vergleichbarkeit und Benchmarking (Araujo, et al., 2025). Ein zentrales Problem ist zudem die mangelnde Interoperabilität zwischen Systemen sowie das Fehlen standardisierter Schnittstellen und semantischer Modelle (Ferrante, Vitti, & Sassanelli, 2025). Ohne harmonisierte Datenstrukturen, Taxonomien und gemeinsame Bedeutungsräume bleibt die systemübergreifende Nutzung von Daten stark eingeschränkt (Aslam & Rossi, 2024).

2.3 Methodik & Messung

Ein zentrales Ziel der CE ist die belastbare Messung und Bewertung von Zirkularität. Hier bestehen jedoch grundlegende methodische Defizite. Während für Recyclingprozesse nutzbare Daten und Indikatoren existieren, sind höherwertige zirkuläre Strategien der R-Strategien bislang nur unzureichend messbar (Sassanelli & Rosa, 2019; Ferrante, Vitti, & Sassanelli, 2025). Es fehlt an standardisierten Kennzahlen (Key Performance Indicators, KPI), harmonisierten Bewertungsansätzen und einheitlichen Reporting-Strukturen. Dies führt zu eingeschränkter Vergleichbarkeit zwischen Unternehmen, Sektoren und Initiativen (Elia, Gnoni, & Tornese, 2017; Rincón-Moreno, Ormazábal, Álvarez, & Jaca, 2021). Zusätzlich erschwert die multidimensionale Natur der nachhaltigen Entwicklung (Ökologie, Ökonomie und Soziales) die Entwicklung konsistenter Analysemodelle (Luthin, Traverso, & Crawford, 2024). In der Praxis zeigt sich zudem

eine unausgewogene Indikatornutzung: Umweltkennzahlen dominieren (Aslam & Rossi, 2024), während soziale und innovationsbezogene Aspekte unterrepräsentiert sind. Eine weitere Herausforderung stellt die Unklarheit von Systemgrenzen dar (Pauliuk, Arvesen, Stadler, & Hertwich, 2017). Offene und sektorübergreifende Kreisläufe, indirekte Materialflüsse oder Lagerbestände machen eine eindeutige Abgrenzung schwierig. Dies erhöht das Risiko einer verzerrten Darstellung von Zirkularitätsindikatoren. Zudem sind qualitätssensitive Metriken bislang nicht ausreichend etabliert, wie beispielsweise das Konzept des „Linearity Loss", das den Wert- und Qualitätsverlust von Materialien über mehrere Nutzungszyklen hinweg beschreibt. Ohne solche Ansätze können Unterschiede zwischen kurzlebigen und langlebigen Materialien nur unzureichend abgebildet werden.

2.4 Organisation & Fähigkeiten

Neben technischen und methodischen Fragestellungen spielen organisationale Faktoren eine zentrale Rolle. Insbesondere kleinen und mittleren Unternehmen (KMU) fehlt es an ausreichender Datenkompetenz, um CE-Daten systematisch zu erfassen, zu analysieren und in Entscheidungsprozesse zu integrieren. Oft besteht Unsicherheit darüber, welche Daten überhaupt relevant sind und wie diese beispielsweise für Instrumente wie den Digitalen Produktpass (DPP) genutzt werden können (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz, 2024). Gleichzeitig erschwert der hohe manuelle Aufwand bei der Berichterstattung (z. B. im Kontext der Corporate Sustainability Reporting Directive (CSRD)) eine effiziente Umsetzung datengetriebener Ansätze. Hinzu kommt ein Mangel an interdisziplinärer Zusammenarbeit zwischen Fachbereichen wie IT, Nachhaltigkeit, Produktion oder Controlling. Diese Fragmentierung auf organisatorischer Ebene spiegelt sich häufig auch in der Datenlandschaft wider.

2.5 Ökonomische und strategische Unsicherheit

Schließlich bestehen auch auf strategischer Ebene erhebliche Unsicherheiten. Der wirtschaftliche Nutzen datengetriebener CE-Ansätze ist für viele Unternehmen noch nicht eindeutig belegt. Unklare Geschäftsmodelle, fehlende Best-Practices und schwer quantifizierbare Mehrwerte führen dazu, dass Investitionen in Dateninfrastruktur und -kompetenzen oft zurückgestellt werden. Hohe Anfangsinvestitionen stehen unsicheren oder langfristigen Erträgen gegenüber.

2.6 Daten-Governance

Die Umsetzung der Kreislaufwirtschaft ist ebenfalls eine Frage der Daten-Governance. Es bestehen erhebliche Herausforderungen hinsichtlich Datensouveränität, Zugriffskontrolle und Schutz geistigen Eigentums sowie von Geschäftsgeheimnissen. Unternehmen sind häufig zurückhaltend beim Teilen von Daten, insbesondere entlang komplexer und wettbewerbsintensiver Lieferketten. Diese geringe Bereitschaft zum Datenaustausch wird durch fehlendes Vertrauen zwischen Akteuren sowie durch unklare regulatorische und organisatorische Rahmenbedingungen verstärkt. Unterschiedliche Governance-Strukturen führen dazu, dass Datenzugang und -verfügbarkeit stark variieren. Zudem fehlen häufig einheitliche Plattformen (z. B. Datenräume), die eine vertrauenswürdige und sichere Datennutzung ermöglichen (Berg & Wilts, 2019; Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz, 2024). Die eingeschränkte Transparenz entlang der Lieferkette,

insbesondere eine unzureichende Rückverfolgbarkeit, reduziert die Aussagekraft und Verlässlichkeit von CE-Daten erheblich (Howard, Hopkinson, & Miemczyk, 2019).

2.7 Übergreifende Herausforderungen

Über alle Kategorien hinweg zeigt sich, dass CE-Daten durch eine hohe Komplexität und Multidimensionalität geprägt sind. Unterschiedliche Zielgrößen, wie etwa ökologische Wirkung, ökonomische Effizienz und soziale Aspekte, können in Zielkonflikten zueinanderstehen und erfordern eine sorgfältige Abwägung (Luthin, Traverso, & Crawford, 2024). Die Vielfalt an Datentypen und -einheiten sowie die fehlende Harmonisierung erschweren die Entwicklung kohärenter und interoperabler Analyseframeworks erheblich. Gleichzeitig wird die Identifikation von „Hotspots“, den Bereichen mit besonders hohen Umweltauswirkungen oder geringer Zirkularität, durch Datenlücken und methodische Unsicherheiten erschwert. Hier bieten strukturierte Bewertungsansätze, wie sie beispielsweise in vorangegangenen Meilensteinberichten (Nolte, Bezerra de Araujo, & Farrukh, 2025) entwickelt wurden, einen wichtigen Anknüpfungspunkt. Sie ermöglichen es, zentrale Problembereiche systematisch zu identifizieren und darauf aufbauend datengetriebene Best-Practices abzuleiten. Weiterhin lässt sich festhalten, dass die Herausforderungen einer datengetriebenen Kreislaufwirtschaft weit über rein technische Fragestellungen hinausgehen. Sie betreffen die gesamte Wertschöpfungskette, von der Datenerhebung über die Integration und Governance bis hin zur Bewertung und strategischen Nutzung. Ihre Bewältigung erfordert neben technologischen Lösungen insbesondere standardisierte Rahmenwerke, vertrauensvolle Kooperationsmodelle zum Datenaustausch sowie den gezielten Aufbau von Datenkompetenzen.

3 Methoden & Vorgehensweise

Aufbauend auf den in Kapitel 2 dargestellten Herausforderungen einer datengetriebenen Kreislaufwirtschaft werden im Folgenden zentrale Methoden und strukturierte Vorgehensweisen aufgezeigt, die zur Bewältigung der Herausforderungen eingesetzt werden können. Um den praktischen Mehrwert dieser Methoden zu verdeutlichen, werden diese explizit den Herausforderungskategorien aus Kapitel 2 zugeordnet.

Tabelle 3.1: Exemplarische Zuordnung von Methoden zu den CE-Daten-Herausforderungen.

Methode / Vorgehensweise	Herausforderungen	
Strukturierte Modellierung von CE-Daten	Datenbasis	Fehlen relevanter Daten
	Datenarchitektur und -integration	Datenfragmentierung
		Fehlende Standardisierung und Semantik
Systematische Aggregation und Operationalisierung von Daten	Methodik & Messung	Fehlen standardisierter CE-Kennzahlen
		Unklarheit der Systemgrenzen
	Organisation & Fähigkeiten	Mangelnde Datenkompetenz
Identifikation von Zirkularitäts-Hotspots	Datenbasis	Verfügbarkeitslücken
	Übergreifende Herausforderungen	Unausgewogene Ressourcenallokation
Etablierung harmonisierter Rahmenwerke und Standards	Datenarchitektur und -integration	Mangelnde technische Interoperabilität und Schnittstellen
		Fehlende standardisierte Taxonomien und Semantik
	Daten-Governance	Bedenken hinsichtlich Datenhoheit & geistigem Eigentum
		Mangelndes Vertrauen entlang der Lieferketten
Kompetenzentwicklung und Kapazitätsaufbau für eine datengetriebene Kreislaufwirtschaft	Organisation & Fähigkeiten	Mangelnde Datenkompetenz
		Mangelnde interdisziplinäre Zusammenarbeit
		Hoher manueller Aufwand bei der Berichterstattung
Systematische Integration heterogener Datenquellen	Datenarchitektur und -integration	Datensilos und Fragmentierung über Systeme hinweg
		Mangelnde technische Interoperabilität und Schnittstellen
		Heterogene Formate

Die Tabelle 3.1 zeigt exemplarisch die CE-Daten-Herausforderungen und potenzielle Methoden und Vorgehensweisen, um die Herausforderungen zu bewältigen. Die dargestellten Methoden lassen sich in Kategorien von verschiedenen Datenkompetenzen wie Datenanalyse, Datenkultur einordnen, wodurch Abhängigkeiten zwischen Datenkompetenzen und CE-Daten-Herausforderungen abgeleitet werden können.

3.1 Strukturierte Modellierung von CE-Daten

Adressierte Herausforderungen: Datenfragmentierung, fehlende Vergleichbarkeit, Multidimensionalität

Die Herausforderungen der Datenfragmentierung und der fehlenden Vergleichbarkeit zwischen Datensätzen sowie die Multidimensionalität der Daten können durch die strukturierte Modellierung von CE-Daten adressiert werden. Daten können hierbei entlang klar definierter Dimensionen organisiert werden. Hierzu können die Systemebenen (Nano-, Mikro-, Meso- und Makroebene), Lebenszyklusphasen, Zielgruppen sowie zirkuläre Strategien (z. B. R-Strategien) als mögliche Dimensionen dienen. Entsprechende multidimensionale Modelle ermöglichen es, heterogene Datenquellen in einen konsistenten Bezugsrahmen zu überführen und damit Transparenz sowie Vergleichbarkeit zu erhöhen (Araujo, et al., 2025). Diese Form der Datenstrukturierung bildet eine wesentliche Grundlage für die Integration fragmentierter Datenlandschaften und adressiert somit insbesondere Herausforderungen der Datenarchitektur.

3.2 Systematische Aggregation und Operationalisierung von Daten

Adressierte Herausforderungen: Fehlende standardisierte Kennzahlen, methodische Unsicherheiten, eingeschränkte Vergleichbarkeit

Für die Überwindung von methodischen und messtechnischen Herausforderungen, können aufbauend auf der strukturierten Modellierung von Daten, etablierte Ansätze im Performance Measurement genutzt werden. Hierbei werden Rohdaten schrittweise in Metriken, Indikatoren, zusammengesetzte Indizes und schließlich in KPIs überführt (Neely, Adams, & Kennerley, 2002; International Organization for Standardization, 2021). Diese Hierarchisierung ermöglicht es, komplexe technische Daten in steuerungsrelevante Kennzahlen zu übersetzen und damit für Entscheidungsprozesse nutzbar zu machen. Gleichzeitig trägt sie zur Standardisierung und Vergleichbarkeit von Bewertungsansätzen bei und wirkt methodischen Unsicherheiten entgegen.

3.3 Identifikation von Zirkularitäts-Hotspots

Adressierte Herausforderungen: Begrenzte Datenverfügbarkeit, unklare Systemgrenzen, unausgewogene Ressourcenallokation

Durch Einsatz von Analysewerkzeugen können Bereiche, die besonders hohe Umwelteinwirkungen haben oder geringe Zirkularität aufweisen, innerhalb von Wertschöpfungsketten identifiziert und priorisiert werden. Durch die Priorisierung werden Ressourcen gezielter eingesetzt und Unternehmen können datengetriebene Maßnahmen effizienter umsetzen. Dies kann u. a. beim Umgang mit begrenzter Datenverfügbarkeit und unsicheren Systemgrenzen helfen. Zudem können so schrittweise Verbesserungen an kritischen Stellen von Wertschöpfungsketten realisiert werden.

3.4 Etablierung harmonisierter Rahmenwerke und Standards

Adressierte Herausforderungen: Fehlende Interoperabilität, mangelnde Governance, eingeschränkter Datenaustausch

Einheitliche Datenmodelle, Taxonomien sowie standardisierte Schnittstellen fördern die Interoperabilität zwischen Systemen und reduzieren Integrationsaufwände (World Business Council for Sustainable Development; One Planet Network, 2025). Gleichzeitig stärken sie die Glaubwürdigkeit und Nachvollziehbarkeit von CE-Daten. Empirische Erkenntnisse zeigen, dass

Unternehmen verstärkt nach solchen harmonisierten Lösungen verlangen und sektorübergreifende Koordination erforderlich ist (Aslam & Rossi, 2024). In diesem Kontext gewinnen auch vertrauenswürdige Datenräume und kooperative Governance-Modelle zunehmend an Bedeutung. Eine Kombination dieser Methoden kann die Hürden zur Daten-Governance reduzieren.

3.5 Kompetenzentwicklung und Kapazitätsaufbau für eine datengetriebene Kreislaufwirtschaft

Adressierte Herausforderungen: Fehlende Datenkompetenz in KMU, mangelnde interdisziplinäre Zusammenarbeit, hoher manueller Aufwand

Darüber hinaus sind Strategien zur Überwindung organisatorischer und technischer Barrieren zentral für die Umsetzung dieser Ansätze. Capacity-Building-Programme werden breit empfohlen, insbesondere Upskilling-Initiativen, die interdisziplinär angelegt sind und Kompetenzen der Kreislaufwirtschaft mit digitalen Fähigkeiten verknüpfen. Solche Ansätze ermöglichen es Akteuren entlang der Wertschöpfungskette, Daten der Kreislaufwirtschaft effektiv zu interpretieren und zu nutzen.

3.6 Systematische Integration heterogener Datenquellen

Adressierte Herausforderungen: Datensilos, fehlende Interoperabilität zwischen Systemen, heterogene Formate und Einheiten

Die Komplexität von Kreislaufsystemen kann durch Integration unterschiedlicher Datenquellen und Datentypen systematisch dargestellt werden. Hierzu können beispielhaft folgende Datentypen betrachtet werden:

- Operative Unternehmensdaten (z. B. aus ERP-Systemen, Systemen für Product Lifecycle Management (PLM) oder dem Internet of Things (IoT)) liefern hochauflösende Primärdaten zu Materialflüssen und Prozessen.
- Analytische Modelle wie Materialflussanalysen (MFA) oder Input-Output-Analysen ermöglichen eine übergeordnete Systemperspektive.
- Regulatorische und öffentliche Datenbanken tragen zur Standardisierung und Vergleichbarkeit bei.
- Produktbezogene Datenquellen (z. B. Umweltproduktdeklarationen) unterstützen lebenszyklusbasierte Bewertungen.
- Finanz- und Innovationsdaten liefern Einblicke in ökonomische und technologische Entwicklungen.
- Offenlegungsplattformen und Ratingsysteme ermöglichen sektorübergreifende Vergleiche.
- Lieferkettenbezogene Daten erweitern die Transparenz über Unternehmensgrenzen hinweg.

Die Kombination dieser Datenquellen erfordert geeignete Integrationsstrategien, die sowohl technische als auch semantische Interoperabilität sicherstellen. Gleichzeitig muss die Qualität und Konsistenz der Daten durch geeignete Governance-Mechanismen abgesichert werden. In diesem Kontext kann die Datenqualität durch den Einsatz fortgeschrittener Verfahren, wie etwa KI-gestützter Anomalieerkennung, verbessert werden, die es ermöglicht, Inkonsistenzen zu identifizieren, Datensätze zu bereinigen und die Verlässlichkeit für die Kreislaufwirtschaft relevanter Datenflüsse zu erhöhen (Pourrahimian, Seyedzadeh, Arabi, Kahani, & Lotfian, 2026).

Die beschriebenen Methoden sind nicht trennscharf voneinander abzugrenzen und in der Praxis wirken sie häufig komplementär. Durch die systematische Verknüpfung methodischer Bausteine mit einem Datenkompetenz-Framework entsteht eine Basis für die Implementierung datengetriebener Kreislaufwirtschaft.

4 Best-Practices

Kapitel 4 konkretisiert die in den vorangegangenen Abschnitten entwickelten methodischen Grundlagen anhand konkreter Anwendungsbeispiele. Für jedes Best-Practice-Beispiel wird aufgezeigt, welche Herausforderungen aus Kapitel 2 adressiert werden, welche Methoden aus Kapitel 3 zum Einsatz kommen und welche Datenkompetenzen für die Umsetzung erforderlich sind. So wird die Verbindung zwischen Problemanalyse, methodischer Grundlage und praktischer Anwendung nachvollziehbar dargelegt. Die ausgewählten Best-Practice-Beispiele veranschaulichen übertragbare Vorgehensweisen, erheben jedoch keinen Anspruch darauf, allgemeingültige oder abschließende Lösungsansätze darzustellen; abhängig vom jeweiligen Anwendungskontext können weitere methodische Vorgehensweisen und Lösungswege geeignet sein.
Dabei sind zwei Ebenen zu unterscheiden. Kapitel 3 benennt übergeordnete Vorgehensweisen (Tabelle 3.1), die beschreiben, welcher Lösungsweg eine Herausforderung adressiert. Kapitel 4 konkretisiert demgegenüber die Methoden und Werkzeuge, mit denen diese Vorgehensweisen operativ umgesetzt werden, etwa Ökobilanzierung, Zirkularitätsindikatoren oder Verfahren der Datenintegration. Die in Abbildung 4.2 verwendete Kategorie „Methoden & Technologien“ bezieht sich auf diese zweite, operative Ebene.
Die Darstellung erfolgt auf zwei Systemebenen: Kapitel 4.1 behandelt die Produktebene (Nano), Kapitel 4.2 die Unternehmensebene (Mikro). Die beiden Best-Practice-Beispiele setzen dabei bewusst unterschiedliche Schwerpunkte, um die Bandbreite datengetriebener Anwendungen der Kreislaufwirtschaft abzubilden. Während das Beispiel auf der Nanoebene zeigt, wie Umweltwirkungs- und Zirkularitätsinformationen zur Bewertung von Produktsystemen und zur Ableitung von Optimierungsmaßnahmen genutzt werden können, adressiert das Beispiel auf der Mikroebene die Strukturierung heterogener CE-Informationen durch eine multidimensionale Indikatorentaxonomie und eine darauf aufbauende Datenextraktionsarchitektur.

4.1 Best-Practices für die Produktebene (Nano)

Dieses Best-Practice richtet sich an Unternehmen, die ihre Produkte belastbar auf Kreislauffähigkeit bewerten möchten, sowie an Forschende, die vergleichende Produktsystemanalysen durchführen. Gezeigt wird, wie zwei Produktsysteme mit unterschiedlicher Verpackungs- und Nachfülllogik systematisch gegenübergestellt und die Ergebnisse für Optimierungsentscheidungen nutzbar gemacht werden. Obwohl zahlreiche Rahmenwerke und Methoden zur Bewertung der Kreislaufwirtschaft existieren, bleibt die Entwicklung und konsistente Anwendung robuster Indikatoren ein zentrales Forschungs- und Diskussionsfeld (Ferrante, Vitti, & Sassanelli, 2025; Luthin, Traverso, & Crawford, 2024; Ahmed, Nazzal, Darras, & Deiab, 2022). Gleichzeitig suchen Unternehmen nach Orientierung und praktikablen Ansätzen, um Zirkularität operativ umzusetzen, wobei Indikatoren als Kern von Leistungsmessungssystemen datenbasierte Entscheidungen und die Fortschrittsverfolgung ermöglichen (Barreiro-Gen & Lozano, 2020). Dieses Best-Practice adressiert somit primär die folgenden in Kapitel 2 eingeführten Herausforderungen:

- Methodik & Messung: Fehlen standardisierter CE-Kennzahlen; unzureichende Messung höherwertiger Kreisläufe (z. B. Reduce, Reuse)
- Übergreifende Herausforderungen: Zielkonflikte zwischen ökologischen Auswirkungen und Zirkularitätsbewertung

Zur Bewältigung dieser Herausforderungen greift der Anwendungsfall auf zwei Vorgehensweisen aus Tabelle 3.1 zurück:

- Systematische Aggregation und Operationalisierung von Daten: Die Material- und Energieflussdaten beider Produktsysteme werden über die Ökobilanzierung sowie den Material Circularity Indicator (MCI) (Ellen MacArthur Foundation, 2019) zu vergleichbaren Kennzahlen verdichtet.
- Identifikation von Zirkularitäts-Hotspots: Die Ergebnisse werden nach Lebenszyklusphasen und Einzelprozessen aufgeschlüsselt, um die Haupttreiber von Umweltwirkung und Zirkularitätsverlust zu bestimmen.

Operativ umgesetzt werden diese Vorgehensweisen durch eine Ökobilanzierung nach der ReCiPe-2016-Midpoint-Methode (Huijbregts, et al., 2017) sowie eine Zirkularitätsbewertung mittels MCI. Beide Verfahren sind etabliert: Die Ökobilanzierung ist über die Normenreihe ISO 14040/14044 standardisiert, der MCI ist ein in Industrie und Forschung breit rezipierter Zirkularitätsindikator. Der Best-Practice-Charakter dieses Anwendungsfalls liegt entsprechend nicht in der Neuheit der Methoden, sondern in ihrer kombinierten und methodenkritischen Anwendung auf ein konkretes Produktsystem.

Gegenstand dieses Best-Practice ist nicht die Verpackungsinnovation selbst, sondern das Vorgehen, mit dem ihre Kreislauffähigkeit belastbar gemessen und interpretiert wird. Die im weiteren Verlauf abgeleiteten Optimierungsmaßnahmen dienen als Nachweis dafür, dass die gewählte Mess- und Analysemethodik entscheidungsrelevante Erkenntnisse hervorbringt.

Das Kapitel ist entsprechend zweistufig aufgebaut: Die nicht kursiv gesetzten Absätze beschreiben das allgemeine, auf andere Produktsysteme übertragbare Vorgehen in drei Schritten: Abgrenzung der Vergleichssysteme, Aufschlüsselung und Interpretation der Bewertungsergebnisse sowie Ableitung und Prüfung von Optimierungsmaßnahmen. Die kursiv gesetzten Absätze zeigen die jeweilige Umsetzung am Fallbeispiel des Spülmittelkonzentrats.

Die hierfür erforderlichen Datenkompetenzen liegen vor allem in der Datenanalyse (Interpretation, Kommunikation) und der Datenanwendung (Bewertung, kritisch reflektieren, Maßnahmen ableiten).

1. Schritt: Vergleichssysteme definieren und abgrenzen

Für einen Produktsystemvergleich ist es grundsätzlich wichtig, unmissverständlich abzugrenzen, welche Systeme betrachtet werden, worin die wesentlichen Unterschiede zwischen den Systemen liegen und was die Zielsetzung der vergleichenden Bewertung ist. Für eine aussagekräftige Bewertung ist es insbesondere unerlässlich, die Unterschiede der Systeme abzubilden und zu berücksichtigen, da diese potenzielle Auswirkungen auf die Differenz der Bewertungsergebnisse haben.

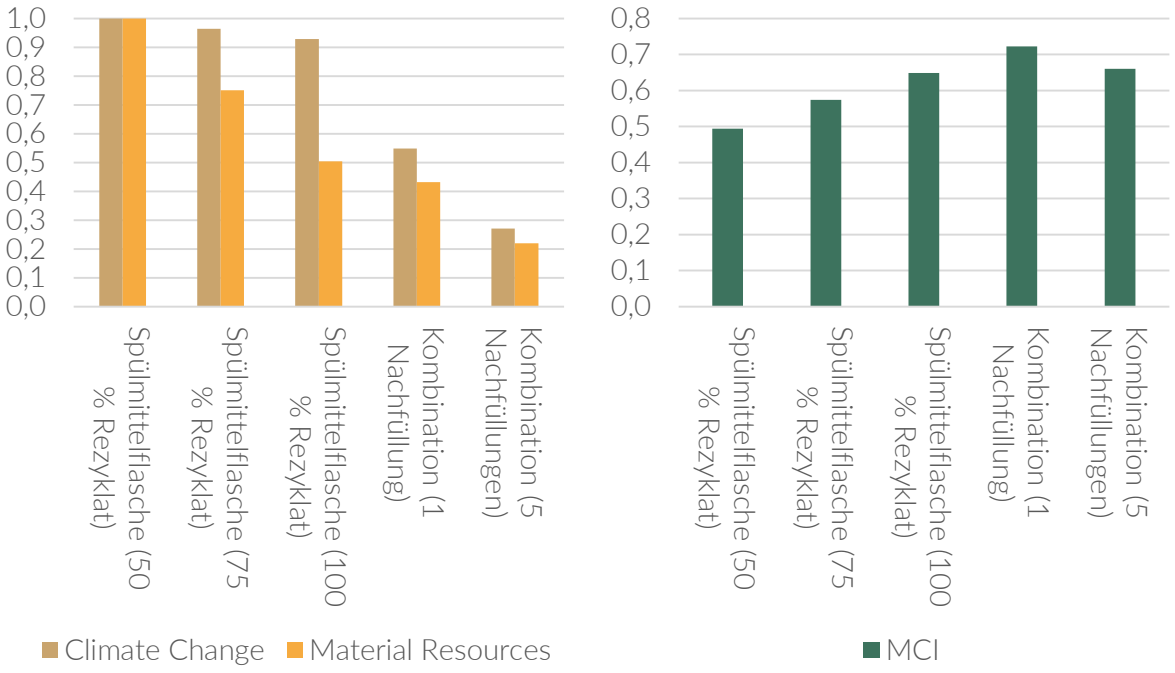

Abbildung 4.1: MCI und zum Referenzszenario „Spülmittelflasche (50 % Rezyklat)" relativierte CO_2- und Kupfer-Äquivalente der untersuchten Produktverpackungen.

Dieser Produktsystemvergleich analysiert eine konventionelle Spülmittelflasche und einen Spülmittelkonzentrat-Standbodenbeutel mit reduzierter transportierter Verpackungs- und Produktmasse (Reduce). Mit dem Konzentrat und Wasser zur Verdünnung soll die herkömmliche ursprüngliche Einwegflasche wieder befüllt werden (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. Eine umfassende Beschreibung dieser Untersuchung ist in dem Meilensteindokument 3.2 zu finden. Die Kernergebnisse sind in Abbildung 4.1 *zu finden. Hierbei handelt es sich um den Material Circularity Indicator und zwei Umweltauswirkungskategorien der ReCiPe 2016 v1.03 Midpoint-Methode* (Huijbregts, et al., 2017). *Der MCI misst auf einer Skala von 0 bis 1, in welchem Maß die Materialflüsse eines Produkts im Kreislauf geführt werden; ein Wert von 1 steht für ein vollständig zirkuläres, ein Wert von 0 für ein vollständig lineares Produktsystem. Als Umweltauswirkungskategorien werden das Treibhauspotenzial in CO_2-Äquivalenten sowie die Verknappung mineralischer Ressourcen in Kupfer-Äquivalenten betrachtet. Letztere drückt den Verbrauch mineralischer Rohstoffe in derjenigen Menge Kupfer aus, die eine vergleichbare Verknappung verursachen würde, und macht damit unterschiedliche Metalle und Mineralien in einer gemeinsamen Bezugsgröße vergleichbar.*

2. Schritt: Bewertungsergebnisse aufschlüsseln und Hotspots identifizieren

Die Ergebnisse aus den Produktsystemvergleichen können anschließend genutzt werden, um abzuleiten, wie diese effektiv weiter optimiert werden können. Hierfür ist es essenziell im Detail zu prüfen, wie sich die verschiedenen Umweltauswirkungen zusammensetzen, welche Prozesse Hotspots darstellen (also Hauptverursacher sind) und woher genau die unterschiedlichen Zirkularitätsergebnisse resultieren.

Während der Standbodenbeutel durch den stark reduzierten Einsatz von Kunststoffmasse im Vergleich zur Flasche die Umweltauswirkungen deutlich reduzieren konnte, fallen die Ergebnisse der Zirkularitätsbewertung unerwartet aus. Zwar steigt die Zirkularität bzw. der Material Circularity Indicator für das Nachfüllsystem im Vergleich zum herkömmlichen Produkt, allerdings sinkt die

Zirkularität mit erhöhter Anzahl an Wiederbefüllungen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der Standbodenbeutel im Gegensatz zur Flasche ausschließlich aus Primärmaterial hergestellt wird. Je mehr Wiederbefüllungen, desto stärker ist der Einfluss der niedrigen Zirkularität des Beutels, da dieser zunehmend zur funktionellen Einheit beiträgt. Des Weiteren wird durch den MCI die R-Strategie Reduce nicht direkt positiv berücksichtigt für die Zirkularität, wodurch ein wesentlicher Vorteil des Standbodenbeutels nur im Rahmen des Life Cycle Assessment (LCA) berücksichtigt werden kann. Grundsätzlich muss jedoch darauf hingewiesen werden, dass die Umweltauswirkungen der Nutzungsphase des Spülmittels mit ca. 85 % und dessen Produktion mit ca. 5 % bis 25 % überwiegen. Somit sind die Auswirkungen des neuen Verpackungsdesigns im Vergleich kaum sichtbar. Da die Nutzung und Produktion der beiden Produkte allerdings in Summe keine signifikanten Unterschiede in ihren Ressourcenflüssen und Umweltauswirkungen aufweisen, werden diese z. T. ausgeklammert, um sich auf den visuell größten Unterschied, die verschiedenen Verpackungsdesigns, zu fokussieren.

3. Schritt: Optimierungsmaßnahmen ableiten und bewerten

Diese Erkenntnisse und Zielkonflikte bieten Aufschlüsse dazu, welche Parameter entscheidend sind, um das Produkt weiter zu optimieren hinsichtlich seiner Kreislauffähigkeit. Basierend auf dieser Analyse können anschließend diverse Maßnahmen zur Optimierung abgeleitet werden. Sofern abschließend bestimmte Optimierungsmaßnahmen ausgewählt werden, sollte klar spezifiziert werden, in welcher Form sich diese erwartungsgemäß auf die Bewertungsergebnisse auswirken und ob dadurch eventuelle Zielkonflikte zwischen verschiedenen Bewertungskategorien gelöst werden können oder weiterhin bestehen.



Herausforderung:

- Fehlen standardisierter CE-Kennzahlen
- Zielkonflikt zwischen ökologischen und Zirkularitätsaspekten
- unzureichende Messung höherwertiger Kreisläufe

Problemdefinition:

- „Rethink" des Produktsystems wurde bewertet hinsichtl. Nachhaltiger Kreislauffähigkeit
- Ziel: noch ungenutzte Optimierungspotenziale und konkrete Maßnahmen aus Ergebnissen ableiten

Methoden & Technologien:

- Ökobilanzierung in OpenLCA
- Zirkularitätsbewertung durch Nutzung des MCIs

Datenkompetenzen:

- Datenanalyse (Interpretation, Kommunikation)
- Datenanwendung (Bewertung, kritisch reflektieren, Maßnahmen ableiten)

Abbildung 4.2: Beispielhaftes Design einer optimierten Spülmittelkonzentrat-Verpackung. (erstellt mithilfe von OpenAI)

Eines von vielen möglichen Designs des optimierten Produkts ist in Abbildung 4.2 dargestellt inkl. einer Zusammenfassung der Herausforderungen, angewandten Methoden und Datenkompetenzen dieses „Best-Practices".

Da die Nutzungsphase den größten Beitrag zu den Umweltauswirkungen leistet, erscheint es essenziell diese zu optimieren, indem z. B. vermieden wird, dass überflüssig hochtemperiertes Wasser genutzt wird oder das Konzentrat nicht ausreichend verdünnt wird. Um dies zu verhindern, werden leicht

zugängliche Hinweise direkt auf der Vorderseite der Verpackung platziert. Zudem erscheint das Einsparpotenzial bei der Verpackungsmasse noch nicht ausgereizt zu sein, wenn ein Standbodenbeutel nur zur einmaligen Wiederbefüllung einer Flasche ausreicht (Prakash, et al., 2022). *Die Steigerung des Volumens für drei bis fünf Refills einer Flasche erscheint hier machbar, auch wenn dadurch eine Verschlussmöglichkeit der Verpackung berücksichtigt werden muss* (Fresán, Errendal, Craig, & Sabaté, 2019). *Zuletzt könnte der Zielkonflikt zwischen Zirkularitätsergebnissen und Ökobilanzierungsergebnissen potenziell gelöst werden, indem für den Standbodenbeutel ebenfalls Rezyklat eingesetzt wird anstelle von reinem Primärmaterial. Allerdings sind das Recycling und die Produktion von Kunststofffolien sensibler und herausfordernder als für Flaschen, u. a. aufgrund der geringeren Wandstärke* (Pelgrims, et al., 2025).
Der Best-Practice-Charakter liegt somit weniger im konkreten Verpackungsdesign oder in der Neuheit der eingesetzten Methoden als in einem übertragbaren Analysevorgehen: die parallele Anwendung einer wirkungsbezogenen (Ökobilanz) und einer zirkularitätsbezogenen (MCI) Bewertung, die Aufschlüsselung der Ergebnisse nach Hotspots sowie die explizite Prüfung, ob abgeleitete Maßnahmen bestehende Zielkonflikte tatsächlich auflösen oder lediglich verschieben.

4.2 Best-Practices für die Unternehmensebene (Mikro)

Adressiert ist dieser Anwendungsfall an Nachhaltigkeits- und Datenverantwortliche in Unternehmen, die für die ESG- und CE-Berichterstattung zuständig sind, sowie an politische Entscheidungsträger und Standardisierungsorganisationen, welche die Messung, Integration und Nutzung von CE-Daten verbessern wollen. Ausgangspunkt ist die Situation, dass die hierfür benötigten Informationen zwar in Nachhaltigkeitsberichten vorliegen, dort jedoch unstrukturiert und in uneinheitlichen Formaten. Das im Folgenden beschriebene Rahmenwerk ordnet diese Informationen einer einheitlichen Indikatorentaxonomie zu und überführt sie mithilfe einer automatisierten Extraktionspipeline in strukturierte Kennzahlen. Der erwartete Nutzen liegt in einer deutlichen Reduktion des manuellen Aufwands in der Berichterstattung sowie in der Vergleichbarkeit der Ergebnisse über Unternehmen und Sektoren hinweg. Rahmenwerk und Pipeline sind konzeptionell vollständig ausgearbeitet; die empirische Anwendung auf reale Berichtsdaten steht noch aus, sodass im Folgenden das Vorgehen im Vordergrund steht und nicht dessen Ergebnisse.
Der Übergang zu einer Kreislaufwirtschaft erfordert robuste, umsetzbare und skalierbare Ansätze zur Messung und Steuerung über alle Unternehmenssysteme hinweg. Die bestehenden Rahmenwerke zur Leistungsmessung auf Mikroebene sind jedoch in ihrer Fähigkeit, die praktische Umsetzung zu unterstützen, nach wie vor begrenzt. Diese Einschränkungen sind in erster Linie auf fragmentierte Datenlandschaften, einen Mangel an harmonisierten Indikatoren und eine unzureichende Verzahnung zwischen methodischen Fortschritten und unternehmerischen Entscheidungsprozessen zurückzuführen.
Dieses Best-Practice adressiert primär die folgenden in Kapitel 2 eingeführten Herausforderungen:

- Datenarchitektur und Integration: Fragmentierte Datenlandschaften; fehlende Taxonomien und Schnittstellen
- Methodik & Messung: Fehlende standardisierte KPIs; unklare Systemgrenzen; unzureichende Indikatorstruktur
- Organisation & Fähigkeiten: Hoher manueller Aufwand im Reporting; mangelnde Integration in Managementsysteme
- Ökonomische und strategische Unsicherheit: Unklare Geschäftsmodelle; schwer quantifizierbare Mehrwerte datengetriebener CE-Ansätze

Zur Bewältigung dieser Herausforderungen kombiniert der Anwendungsfall die strukturierte Modellierung von CE-Daten, die Etablierung harmonisierter Rahmenwerke und Standards sowie automatisierte Ansätze zur systematischen Integration heterogener Datenquellen. Der Best-Practice-Charakter ergibt sich hier aus der Herkunft des Rahmenwerks: Es synthetisiert 32 etablierte CE-Rahmenwerke aus 137 wissenschaftlichen Publikationen sowie über 100 grauen Quellen zu einer konsolidierten Indikatorentaxonomie. Übertragbar ist damit nicht ein einzelnes Messergebnis, sondern das Prinzip, heterogene Indikatorensysteme über eine gemeinsame Klassifikationslogik anschlussfähig zu machen.

Limitationen bestehender CE-Indikatorrahmenwerke

Für die praktische Umsetzung einer datengetriebenen Kreislaufwirtschaft spielen Indikatoren eine zentrale Rolle, da sie die Messung, Bewertung und Steuerung von Zirkularität ermöglichen (Howard, Hopkinson, & Miemczyk, 2019; Sassanelli & Rosa, 2019; Rincón-Moreno, Ormazábal, Álvarez, & Jaca, 2021; Rossi, Bertassini, Ferreira, Amaral, & Ometto, 2020). Allerdings weisen die derzeit verfügbaren CE-Indikatorenrahmenwerke noch wesentliche Einschränkungen auf, die ihre praktische Anwendung erschweren. Zu den wichtigsten Limitationen zählen:

- Fehlende systemische Perspektive: Zentrale CE-Prinzipien wie Wertschöpfung, Regeneration und Rückverfolgbarkeit werden nur unzureichend berücksichtigt.
- Unvollständige Wertschöpfungskette: Nicht alle Lebenszyklusphasen sind abgedeckt, was die Steuerung von Maßnahmen erschwert.
- Begrenzter Strategieumfang: Höherwertige Strategien (z. B. Wiederverwendung, Reparatur) und biologische Kreisläufe fehlen häufig.
- Hohe methodische Komplexität: Ansätze wie Ökobilanzierung und multikriterielle Methoden erschweren die praktische Umsetzung.
- Unzureichende Indikatorstruktur: Fehlende Differenzierung (z. B. Metriken vs. KPIs) und unklare Aggregationsebenen.
- Geringe organisatorische Anwendbarkeit: Eingeschränkte Vergleichbarkeit, erhöhtes Fehlinterpretationsrisiko und geringe Integration in Managementsysteme.

Entwicklung eines mehrdimensionalen Indikatoren-Rahmenwerks

Die beschriebenen Limitationen zeigen den Bedarf an einem umfassenderen und strukturierteren Ansatz zur Bewertung von Zirkularität. Um diesen Herausforderungen zu begegnen, wird ein ganzheitlicher und systematischer CE-Indikatorrahmen entwickelt:

- Breite Datenbasis: Systematische Literaturrecherche mit 137 Publikationen und über 100 grauen Quellen; Auswahl von 32 etablierten CE-Rahmenwerken.
- Umfangreicher Indikatorensatz: 515 CE-Indikatoren in einer mehrdimensionalen Taxonomie.
- Multidimensionale Struktur: Organisation entlang Wertschöpfungskette, CE-Strategien, Ressourcenflüssen und Zeitbezug.
    - Wertschöpfungskette: 19 Kategorien, die von der Rohstoffgewinnung über Produktion, Nutzung und Entsorgung bis hin zur Umwelt reichen.
    - CE-Strategien: Abdeckung von 16 Kreislaufstrategien.
    - Ressourcenflüsse: Klassifikation nach Typen (Input, Output, Prozess, Bestand, Transformation) und Arten (physisch, Energie, Emissionen, ökonomisch, Information).

Zeit & Sektoren

Unterscheidung von Früh-/Spätindikatoren und Zuordnung zu 21 Branchen im System der Europäischen Union zur Klassifikation und Einteilung aller Wirtschaftszweige und Branchen (NACE).

Value Chain	Strategy	Performance	Transversality	Resource flow type	Resource flow nature	Mathematical form	Temporal orientation
Extraction	Refuse	Technological cycle	Generic	Input	Emissions	absolute indicators	Leading
Supply Chain	Source	Biological cycle	Sector-specific	Output	Energy	shares	Lagging
Production	Rethink	Hybrid cycle		Process	Physical	change rates	
Design	Reduce resource use	System enablers		Stock	Economical	ratios	
Supporting activities	Reuse	System constraints		Transformation	Information	intensity indicators	
Distributors	Repair	Socio-institutional				composite indicators	
Client	Refurbish	Circular strategy				index	
After-sales	Remanufacture	Circular impact				efficiency indicators	
Collection	Repurpose						
Waste management	Cascading						
Waste-to-energy	Recycle						
3rd company	Recover						
Eco-industrial park	Reduce waste						
Energy supply	Reduce impact						
Self-generated energy	Cross-cutting						
Biological treatment	Regenerate						
Government							
Final disposal							
Environment							

Abbildung 4.3: Mehrdimensionales Klassifizierungsmodell für CE-Indikatoren.

Abbildung 4.3 stellt die resultierende Taxonomie im Überblick dar. Neben den zuvor genannten Dimensionen umfasst sie die Art der Leistungsbetrachtung (etwa technologischer, biologischer oder hybrider Kreislauf), die Unterscheidung zwischen generischen und sektorspezifischen Indikatoren sowie die mathematische Form der Kennzahl, beispielsweise Absolutwerte, Anteile, Änderungsraten, Verhältniszahlen oder zusammengesetzte Indizes.

Ein weiterer zentraler Beitrag ist die Entwicklung eines standardisierten Kodierungssystems, das die Dimensionen der Taxonomie in einem einheitlichen Indikatorcode zusammenführt:

- Mehrdimensionale Zuordnung: Jeder Indikator wird nicht nur über seine Messgröße definiert, sondern auch über seine Position in der Wertschöpfungskette sowie seine Rolle für Kreislaufstrategien.
- Erhöhte Konsistenz und Vergleichbarkeit: Die Kombination von Messbereich, Ressourcenmerkmalen und strategischer Relevanz in einem strukturierten Indikatorcode schafft Klarheit in der Interpretation und erleichtert die Nutzung in Entscheidungsprozessen.
- Effiziente Datenorganisation: Das System ermöglicht eine systematische Strukturierung sowie einen gezielten Abruf von Indikatoren und unterstützt deren Integration in organisationale Kontexte.

Beispielhafte Anwendung

Das Kodierungssystem verbindet die Dimensionen des Indikatorrahmens in einem standardisierten Indikatorcode. Dadurch kann jeder Indikator nach verschiedenen Dimensionen eingeordnet werden, zum Beispiel nach Wertschöpfungskette, Ressourcentyp, zeitlicher Orientierung und CE-Strategie. Die folgenden Beispiele zeigen, wie das Kodierungssystem angewendet wird:

- *La_CI_En_Sch_O_14*: Nachlaufender Indikator (La) zur Kreislaufwirkung (CI), bezogen auf Energie/Emissionen (En), angesiedelt in der Lieferkette (Sch), mit Ergebnisfokus (O) und Bezug zur Strategie der Umweltentlastung (14).
- *La_CS_Ph_Sch_R_05*: Nachlaufender Indikator (La) zur Kreislaufstrategie (CS), bezogen auf physische Ressourcen (Ph), in der Lieferkette (Sch), mit Fokus auf Ressourcenzirkulation (R) und Bezug zur Wiederverwendungsstrategie (05).

Mehrwert des Kodierungssystems

Das Kodierungssystem verdichtet mehrere Informationsdimensionen in einer einheitlichen Bezeichnung und verbessert so Interpretierbarkeit, Vergleichbarkeit und Analyse von Ressourcendynamiken.

Reifegrad des Indikatorrahmens

Der Indikatorrahmen befindet sich in der finalen Entwicklungsphase, baut auf einem bestehenden Modell auf und erweitert dieses um methodische Verbesserungen und einen breiteren Referenzrahmen.

Vorgehensweisen für die Datenextraktion und -integration

Zur Umsetzung des Rahmenwerks wird ein strukturierter Ansatz zur Datenextraktion und -integration eingesetzt, der fragmentierte und unstrukturierte Daten in einen kohärenten, skalierbaren Datensatz überführt. Dabei werden semantische Modellierung und fortgeschrittene Extraktionstechniken kombiniert, um relevante Informationen aus verschiedenen Quellen systematisch zu identifizieren und zu strukturieren. Als primäre Datenquelle dienen Nachhaltigkeitsberichte von Unternehmen, die umfangreiche ESG- und kreislaufwirtschaftsrelevante Informationen enthalten. Aufgrund ihrer fehlenden Struktur sowie hohen Variabilität in Format und Qualität eignen sie sich besonders zur Demonstration des Bedarfs an robusten Extraktions- und Strukturierungsmethoden. Zur konsistenten Interpretation kommen vordefinierte Ontologien und standardisierte Datenmodelle zum Einsatz, die eine direkte Anbindung an den mehrdimensionalen Indikatorrahmen ermöglichen. Der Extraktionsprozess umfasst semantische Interpretation, kontextbezogene Abfragen und regelbasierte Validierung zur Transformation unstrukturierter Daten in strukturierte Indikatoren. Die Datenextraktionspipeline befindet sich in der finalen Entwicklungsphase; Architektur und Methodik sind vollständig definiert, eine empirische Validierung auf Basis realer Datensätze steht jedoch noch aus.

Auswirkungen auf die Bewertung und Entscheidungsfindung in der Kreislaufwirtschaft

Die Kombination aus dem mehrdimensionalen Indikatorrahmen und dem Ansatz zur Datenextraktion adressiert wesentliche Mängel bei der Messung und Umsetzung von Kreislaufwirtschaft. Durch die Integration verschiedener Quellen in eine einheitliche Struktur werden Datenfragmentierung und -heterogenität verringert, während Validierungsmechanismen und semantische Architekturen die Datenqualität und Rückverfolgbarkeit verbessern. Tabelle 4.1 fasst die im Anwendungsfall adressierten Herausforderungen zusammen und zeigt, wie die in Kapitel 3 vorgestellten Methoden zur Bewältigung der in Kapitel 2 identifizierten CE-Datenherausforderungen beitragen.

Tabelle 4.1: Adressierung von CE-Daten-Herausforderungen im Best-Practice-Beispiel auf Unternehmensebene.

Herausforderung	Spezifische Themen	Methoden & Vorgehensweisen	Umsetzung im Anwendungsfall
Mangelnde Datenbasis	Daten-fragmentierung	Strukturierte Modellierung von CE-Daten; Systematische Integration heterogener Datenquellen	Large Language Model-Pipeline zur Integration mehrerer Quellen zu einheitlichen Datensätzen
	(schlechte) Datenqualität		Verbesserung der Genauigkeit durch regelbasierte Validierung Validierung und Ontologie-Zuordnung
	Daten-heterogenität		Umwandeln von Text, Tabellen und Bilder in strukturierte Daten
Datenarchitektur und -integration	Fehlende Schnittstellen	Etablierung harmonisierter Frameworks und Standards; Mehrdimensionale Klassifikationsmodelle	Systemintegration mithilfe einer semantischen Ebene
	Fehlende Taxonomien		Standardisierung mithilfe eines mehrdimensionalen Rahmenwerks
	Fehlende Standards		515 harmonisierte Indikatoren aus globalen Rahmenwerken
Methodik & Messung	Manuelles Reporting	Automatisierte Datenextraktionsansätze; Semantische Interpretation und kontextbasierte Informationsgewinnung	Automatisierte Extraktion der notwendigen Daten
Organisation & Fähigkeiten	Fehlende Kompetenzen	Datenkompetenz-Frameworks; Harmonisierte Indikatorentaxonomien	Verbesserung durch standardisierte Schnittstellen
	Uneinheitliche Einführung von Indikatoren		Breite Abdeckung von Unternehmen und Indikatoren (ökologisch, sozial, wirtschaftlich)
	Unklare Systemgrenzen		Übersichtliche Zuordnung der Wertschöpfungskette
	Fehlende KPI		Strukturierte Indikator-Taxonomie
Ökonomische & strategische Unsicherheit	Unklare Geschäfts-modelle	Identifikation von Circularity-Hotspots; Datengetriebene Circularity-Bewertungen	Datengestützte Erkenntnisse für die Return on Investment (ROI) -Analyse
	Hohe Kosten		Reduzierung des Bedarfs an Primärdatenerhebung

Methodisch bietet der Rahmen einen standardisierten und zugleich flexiblen Ansatz zur Messung der Kreislaufwirtschaft. Dadurch werden Unsicherheiten bezüglich Systemgrenzen reduziert und die Integration ökologischer, wirtschaftlicher sowie sozio-institutioneller Dimensionen ermöglicht, was konsistentere und umfassendere Bewertungen unterstützt.

Im Idealfall unterstützen die in diesem Anwendungsfall dargestellten Ansätze den Aufbau zentraler Datenkompetenzen, die für eine datengetriebene Kreislaufwirtschaft erforderlich sind. Sie können die Datenkultur unterstützen, indem sie das Bewusstsein für den strategischen Wert von CE-Daten sowie die Notwendigkeit standardisierter und transparenter Indikatorensysteme fördern. Die strukturierte Nutzung von Nachhaltigkeitsberichten und vordefinierten Ontologien kann zur Datenerfassung beitragen, indem relevante Datenquellen und -anforderungen systematisch identifiziert werden. Die semantische Modellierung, Validierungsmechanismen und Integrationspipeline können das Datenmanagement unterstützen, indem sie die Bereinigung, Strukturierung und Harmonisierung heterogener Daten ermöglichen. Durch das

multidimensionale Indikatoren-Framework kann die Datenanalyse unterstützt werden, indem eine konsistente Interpretation, Vergleichbarkeit und Auswertung von Zirkularität ermöglicht wird. Die Generierung standardisierter Indikatoren und KPIs kann die Datenanwendung unterstützen, indem sie evidenzbasierte Entscheidungen auf strategischer und operativer Ebene ermöglicht. Schließlich kann die Nutzung harmonisierter Taxonomien und strukturierter Outputs zur Datenveröffentlichung beitragen, indem sie die Zugänglichkeit, Vergleichbarkeit und den organisationsübergreifenden Austausch von Daten unterstützt.

5 Fazit und Handlungsempfehlungen

Kapitel 1 hat die Forschungsfrage formuliert, wie sich die Zirkularität und Nachhaltigkeit bestehender (CE-) Prozesse und Maßnahmen bewerten lassen, um deren ökologische und ökonomische Auswirkungen zu beurteilen. Die beiden Anwendungsfälle adressieren diese Fragestellung aus unterschiedlichen Perspektiven und auf unterschiedlichen Systemebenen. Dabei verdeutlichen sie jeweils die Bedeutung einer anwendungsbezogenen Auswahl, Kombination und Strukturierung von Kennzahlen und CE-Daten. Auf der Produktebene ergibt erst die parallele Betrachtung von Ökobilanz und Material Circularity Indicator ein belastbares Bild der Kreislauffähigkeit. Auf der Unternehmensebene steht mit 515 konsolidierten Indikatoren ein umfangreicher Kennzahlensatz zur Verfügung; entscheidend ist die gemeinsame Struktur, die dessen Nutzung ermöglicht.
Aus den Ergebnissen lassen sich für die in diesem Dokument adressierten Zielgruppen die folgenden Handlungsempfehlungen ableiten.

Unternehmen

- Mehrdimensionale Bewertung und Dokumentation von Zielkonflikten. Zirkularität und Umweltwirkung sollten mit mindestens zwei Kennzahlen bewertet und getrennt ausgewiesen werden. Der in Kapitel 4.1 dargestellte Fall zeigt, dass eine einzelne Kennzahl zu unvollständigen Schlussfolgerungen führen kann: Der MCI bildet eine Maßnahme nicht ab, die die ökobilanziellen Ergebnisse deutlich verbessert. Werden auf dieser Grundlage Optimierungsmaßnahmen abgeleitet, sollte jeweils dokumentiert werden, ob sich bestehende Zielkonflikte dadurch auflösen oder lediglich verschieben.
- Festlegung der Datenstruktur vor der Erhebung. Die zu erfassenden Dimensionen — Lebenszyklusphase, R-Strategie, Ressourcenart und Zeitbezug — sollten vor Beginn der Datenerhebung definiert werden. Dies reduziert Nacharbeit und erhöht die Vergleichbarkeit der Ergebnisse.
- Priorisierung nach Hotspots. Bei begrenzten Ressourcen empfiehlt es sich, den Erhebungsaufwand auf jene Bereiche zu konzentrieren, die den größten Beitrag leisten. Im dargestellten Fall entfallen rund 85 % der Umweltwirkung auf die Nutzungsphase.
- Nutzung vorhandener Datenbestände. Bereits erstellte Nachhaltigkeitsberichte können als Datenquelle erschlossen werden, anstatt Kennzahlen vollständig neu zu erheben.

Forschung

- Erweiterung der Indikatorenbasis um höherwertige R-Strategien. Etablierte Zirkularitätsindikatoren bilden Strategien wie Reduce und Reuse bislang nur unzureichend ab, wie das Beispiel des MCI in Kapitel 4.1 verdeutlicht. Solange diese Lücke besteht, sind ergänzende Bewertungsverfahren erforderlich, um entsprechende Maßnahmen sichtbar zu machen.
- Entwicklung qualitätssensitiver Metriken. Der in Kapitel 2 beschriebene Wert- und Qualitätsverlust von Materialien über mehrere Nutzungszyklen hinweg wird von den derzeit verbreiteten Kennzahlen nicht erfasst.

Politik und Standardisierung

- Harmonisierung von Indikatorentaxonomien. Einheitliche Taxonomien sind eine Voraussetzung dafür, dass Zirkularitätsangaben über Unternehmen und Branchen hinweg vergleichbar werden.
- Maschinenlesbarkeit von Berichtspflichten. Werden Berichtsanforderungen so gestaltet, dass die geforderten Angaben strukturiert auswertbar sind, lässt sich der manuelle Aufwand in der Berichterstattung voraussichtlich deutlich reduzieren.

Damit ist das Ziel des Meilensteins erreicht: Für die Produkt- und die Unternehmensebene liegen dokumentierte Vorgehensweisen vor, die auf etablierten Methoden beruhen und sich auf

vergleichbare Anwendungsfälle übertragen lassen. Die in Kapitel 1 formulierten Kriterien eines Best-Practice sind damit erfüllt.

Offen bleiben zwei Aspekte: Die empirische Erprobung des in Kapitel 4.2 vorgestellten Indikatorrahmens an realen Berichtsdaten steht noch aus und ist Gegenstand der weiteren Projektarbeit. Darüber hinaus bleibt die unzureichende Abdeckung höherwertiger Kreislaufstrategien durch bestehende Zirkularitätsindikatoren eine Einschränkung, die bei der Interpretation entsprechender Bewertungsergebnisse zu berücksichtigen ist.

Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

Abbildung 2.1: Haus der CE-Daten-Herausforderungen. 6
Abbildung 4.1: MCI und zum Referenzszenario „Spülmittelflasche (50 % Rezyklat)“ relativierte CO_2- und Kupfer-Äquivalente der untersuchten Produktverpackungen..... 16
Abbildung 4.2: Beispielhaftes Design einer optimierten Spülmittelkonzentrat-Verpackung. (erstellt mithilfe von OpenAI)..... 17
Abbildung 4.3: Mehrdimensionales Klassifizierungsmodell für CE-Indikatoren. 20

Tabelle 3.1: Exemplarische Zuordnung von Methoden zu den CE-Daten-Herausforderungen.. 10
Tabelle 4.1: Adressierung von CE-Daten-Herausforderungen im Best-Practice-Beispiel auf Unternehmensebene..... 22

Abkürzungsverzeichnis

CE ..... *Circular Economy*
CSRD ..... *Corporate Sustainability Reporting Directive*
DPP ..... *Digitaler Produktpass*
ERP ..... *Enterprise Resource Planning*
ESG ..... *Environmental, Social and Governance*
IoT ..... *Internet of Things*
KMU ..... *Kleine und mittlere Unternehmen*
KPI ..... *Key Performance Indicators*
LCA ..... *Life Cycle Assessment*
MCI ..... *Material Circularity Indicator*
MFA ..... *Materialflussanalysen*
NACE ..... *Nomenclature statistique des activités économiques dans la Communauté européenne*
PLM ..... *Product Lifecycle Management*
ROI ..... *Return on Investment*

Literaturverzeichnis

Ahmed, A. A., Nazzal, M. A., Darras, B. M., & Deiab, I. M. (2022). A comprehensive multi-level circular economy assessment framework. *Sustainable Production and Consumption*, *32*, 700-717. doi:10.1016/j.spc.2022.05.025

Araujo, J., Nolte, A., Berg, H., Dittrich, M., Greiff, K., Plociennik, C., . . . Viere, T. (2025). A Typology for Circular Economy Data. *Journal of Circular Economy*, *3*(1), 1-22. doi:10.55845/UXBM6358

Aslam, H., & Rossi, L. (2024). *Harmonizing Metrics to Measure Circularity: A Call to Action*. World Economic Forum.

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. doi:10.1002/bse.2590

Berg, H., & Wilts, H. (2019). Digital platforms as market places for the circular economy—requirements and challenges. *Sustainability Management Forum (formerly NachhaltigkeitsManagementForum)*, *27*, 1-9. doi:10.1007/s00550-018-0468-9

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz. (2024). *Nationale Kreislaufwirtschaftsstrategie (NKWS)*. Berlin: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz. Retrieved from https://www.bundesumweltministerium.de/download/nationale-kreislaufwirtschaftsstrategie-nkws

Elia, V., Gnoni, M., & Tornese, F. (2017). Measuring circular economy strategies through index methods: A critical analysis. *Journal of Cleaner Production*, *142*, 2741–2751. doi:10.1016/j.jclepro.2016.10.196

Ellen MacArthur Foundation. (2019). *Circularity Indicators: An Approach to Measuring Circularity, Methodology*. ANSYS Granta. doi:10.13140/RG.2.2.29213.84962

European Commission. (2026). *Circular Economy - Policy Context*. Retrieved from Eurostat – Circular Economy Monitoring Framework: https://ec.europa.eu/eurostat/web/circular-economy/information-data/policy-context

Ferrante, M., Vitti, M., & Sassanelli, C. (2025). The evolution of circular economy performance assessment: A systematic literature review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *217*, 115757. doi:10.1016/j.rser.2025.115757

Fresán, U., Errendal, S., Craig, W., & Sabaté, J. (2019). Does the size matter? A comparative analysis of the environmental impact of several packaged foods. *Science of The Total Environment*, *687*, 369-379. doi:10.1016/j.scitotenv.2019.06.109

Howard, M., Hopkinson, P., & Miemczyk, J. (2019). The regenerative supply chain: A framework for developing circular economy indicators. *International Journal of Production Research*, *57*(23), 7300-7318. doi:10.1080/00207543.2018.1524166

Huijbregts, M. A., Steinmann, Z. J., Elshout, P. M., Stam, G., Verones, F., Vieira, M., . . . Van Zelm, R. (2017). ReCiPe2016: A harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, *22*(2), 138-147.

International Organization for Standardization. (2021). *ISO 14031:2021 Environmental management — Environmental performance evaluation — Guidelines*. International Organization for Standardization. Retrieved from https://www.iso.org/standard/81453.html

Luthin, A., Traverso, M., & Crawford, R. (2024). Circular life cycle sustainability assessment: An integrated framework. *Journal of Industrial Ecology*, *28*(1), 41-58.

Neely, A., Adams, C., & Kennerley, M. (2002). *The Performance Prism: The Scorecard for Measuring and Managing Business Success*. London: Prentice Hall Financial Times. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/265453886_The_Performance_Prism_The_Scorecard_for_Measuring_and_Managing_Business_Success

Nolte, A., Bezerra de Araujo, J., & Farrukh, A. (2025). *M3.2: Bewertungsrahmen*. Wuppertal: DACE. Retrieved from https://dace-info.de/fileadmin/Mediathek/Whitepaper/M_3.2_Bewertungsrahmen_OnePager_V1.pdf

Organisation for Economic Co-operation and Development. (2024). *Monitoring progress towards a resource-efficient and circular economy*. OECD Publishing. doi:https://doi.org/10.1787/3b644b83-en

Pauliuk, S., Arvesen, A., Stadler, K., & Hertwich, E. (2017). Industrial ecology in integrated assessment models. *Nature Climate Change*, *7*(1), 13-20. doi:10.1038/nclimate3148

Pelgrims, I., Verberckmoes, A., Efimov, I., Van Steenberge, P. H., D'hooge, D., & Edeleva, M. (2025). Structural Defects and Processing Limitations for Polymer Film Blowing Applications: A Comprehensive Review of Conventional and Emerging Sustainable Technologies. *Polymers*, *17*(24), Article 3314.

Pourrahimian, P., Seyedzadeh, S., Arabi, B., Kahani, D., & Lotfian, S. (2026). Digital Enablers of the Circular Economy: A Systematic Review of Applications, Barriers, and Future Directions. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, *10*(4), 112. doi:10.3390/jmmp10040112

Prakash, S., Gensch, C.-O., Dehoust, G., Antony, F., Stuber-Rousselle, K., Löw, C., . . . Fiala, V. (2022). *Machbarkeitsstudie Modell Deutschland Circular Economy – Endbericht*. https://www.wwf.de/fileadmin/fm-wwf/Publikationen-PDF/Unternehmen/Machbarkeitsstudie-Modell-Deutschland-CE-Endbericht.pdf: WWF Deutschland.

Rincón-Moreno, J., Ormazábal, M., Álvarez, M., & Jaca, C. (2021). Advancing circular economy performance indicators and their application in Spanish companies. *Journal of Cleaner Production*, 279. doi:10.1016/j.jclepro.2020.123605

Rossi, E., Bertassini, A. C., Ferreira, C. d., 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. doi:10.1016/j.jclepro.2019.119137

Sassanelli, C., & Rosa, P. (2019). Circular economy performance assessment methods: A systematic literature review. *Journal of Cleaner Production*, *229*(1), 440-453. doi:10.1016/j.jclepro.2019.05.019

World Business Council for Sustainable Development; One Planet Network. (2025). *Global Circularity Protocol for Business*. Geneva: World Business Council for Sustainable Development. Retrieved from https://www.wbcsd.org/resources/a-global-framework-to-measure-manage-and-communicate-business-circularity/