



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN

Diplomarbeit

Kritische Betrachtung von Methoden und Ansätzen zur Einführung der zirkulären Wertschöpfung auf Mikroebenen mit Fokus auf produzierende Unternehmen im Maschinenbausektor

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines

Diplom-Ingenieurs

unter der Leitung von

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Sebastian Schlund

(E330 Institut für Managementwissenschaften, Bereich: Mensch-Maschine-Interaktion)

Univ.-Ass. Dipl.-Ing. Fabian Holly B.Sc.

(E330 Institut für Managementwissenschaften, Bereich: Betriebstechnik, Systemplanung und Facility Management)

eingereicht an der Technischen Universität Wien

Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften

von

Stefanie Eisl, B.Sc.

01525547 (066 455)

Grasberggasse 7/3/15

1030 Wien

Wien, im September 2022

Stefanie Eisl



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN

Ich habe zur Kenntnis genommen, dass ich zur Drucklegung meiner Arbeit unter der Bezeichnung

Diplomarbeit

nur mit Bewilligung der Prüfungskommission berechtigt bin.

Ich erkläre weiters Eides statt, dass ich meine Bachelorarbeit nach den anerkannten Grundsätzen für wissenschaftliche Abhandlungen selbstständig ausgeführt habe und alle verwendeten Hilfsmittel, insbesondere die zugrunde gelegte Literatur, genannt habe.

Weiters erkläre ich, dass ich dieses Bachelorarbeitsthema bisher weder im In- noch Ausland (einer Beurteilerin/einem Beurteiler zur Begutachtung) in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe und dass diese Arbeit mit der vom Begutachter beurteilten Arbeit übereinstimmt.

Wien, im September 2022

Stefanie Eisl

Danksagung

Eingangs möchte ich mich bei all jenen Personen bedanken, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Allen voran möchte ich mich bei Herrn Univ.-Ass. Dipl.-Ing Fabian Holly für die Betreuung und Begutachtung der Arbeit, sowie seinen persönlichen Einsatz bedanken. Bedanken möchte ich mich zudem bei Univ.-Prof. Dr.-Ing. Sebastian Schlund für seine zusätzliche Betreuung und das konstruktive Feedback.

Mein Dank gilt auch Dipl.-Ing. Thomas Edtmayr, der mich beruflich damit vertraute, mich mit dem Thema Nachhaltigkeit auseinander zu setzen.

Ganz besonders möchte ich mich bei meinen Eltern, Hermine und Peter Eisl, bedanken, die mir nicht nur dieses Studium ermöglichten, sondern mir zudem den emotionalen Rückhalt boten meinen geplanten Weg zu gehen.

Einer der wichtigsten Personen, denen an dieser Stelle ebenfalls Dank gebührt, ist mein Freund Florian, für die unermüdliche Motivation und die nötige Beistand während des Studiums.

Zum Abschluss möchte ich mich noch bei all meinen Freunden und Studienkollegen bedanken, die die Zeit meines Studiums erst so einzigartig gemacht haben.

Kurzfassung

Vorangetrieben durch die Industrialisierung ist global ein progressiver Anstieg an Material- und Energiebedarf zu vernehmen, der weitreichende Folgen für das gesamte Ökosystem der Erde mit sich bringt. Durch eine Entkopplung des Wirtschaftswachstums von dem materiellen Ressourcenverbrauch, das den Grundgedanken der Kreislaufwirtschaft widerspiegelt, soll dieser Problematik entgegengewirkt werden. Für Unternehmen ist eine Verbesserung der Ressourcenproduktivität nicht nur aus ökologischer Sicht notwendig, sondern kann angesichts der zunehmenden Volatilität der Rohstoffpreise auch ökonomische Vorteile bieten.

Trotz steigendem Interesse der Wissenschaft, Industrie und Politik für das Thema Kreislaufwirtschaft stellt die Einführung zirkulärer Wertschöpfung, zufolge Wittpahl (2020), eine große Herausforderung für die Industrie dar, dem ein kurzer Handlungszeitraum gegenübersteht. Da der Konsens über mögliche Umsetzungsstrategien bzw. Methoden gemäß Lim et al. (2022) und Wittpahl (2020) noch abgänglich ist, beschäftigte sich diese Arbeit mit der kritischen Betrachtung von Methoden und Ansätze zur Einführung zirkulärer Wertschöpfung auf Mikroebene mit Fokus auf produzierende Unternehmen im Maschinenbausektor, engl. „Circular Manufacturing“ (CM).

Ziel der Arbeit ist es, derzeit verwendete Methoden und Ansätze zur Einführung zirkulärer Wertschöpfung zu ermitteln und diese kritisch zu durchleuchten. Die Untersuchung der Literatur erfolgte mit Hilfe einer umfangreichen systematischen Literaturrecherche zum Thema „Circular Manufacturing“, deren theoretische Grundlage die Arbeit von Tranfield et al. (2003) bietet. Ausgehend von über 500 Publikationen, die sich aus der Sucheingabe unter Einbezug der Einschlusskriterien ergaben, konnten durch das iterative Ausschlussverfahren insgesamt 47 CM Methoden und Ansätze identifiziert werden, die gemäß aktuellem Stand der Forschung im Maschinenbausektor derzeit vertreten sind. Zur angemessenen Aufbereitung der Ergebnisse wurde ein Kodierungsrahmenwerk entwickelt.

Angesichts der inhärenten Komplexität von zirkulären Systemen wird die Methode der multikriteriellen Entscheidungsfindung (MCDM) herangezogen, um die Kreislauffähigkeit der ermittelten CM Methoden und Ansätze zu beurteilen. Die Auswahl geeigneter MCDM-Techniken wird durch die Meta-Literaturanalyse von dos Santos Gonçalves and Campos (2022) begründet. Da sich, gemäß aktuellem Stand der Forschung, bis dato noch kein Werk mit der Bewertung der Kreislauffähigkeit von CM Methoden und Ansätzen auseinandergesetzt hat, wurde die entwickelte Bewertungsmethode einer Expertenvalidierung unterzogen.

Abstract

Driven by industrialization, globally a progressive increase in material and energy demand can be observed, with far-reaching consequences for the entire ecosystem of the earth. This problem is supposed to be counteracted by decoupling economic growth from material resource consumption, which reflects the basic idea of circular economy. For companies, improving resource productivity is not only necessary from an ecological point of view, but can also offer economic advantages considering the increasing volatility of raw material prices.

Despite increasing interest in the topic of circular economy from science, industry and politics, according to Wittpahl (2020), the introduction of circular manufacturing is a major challenge for industry which is faced within a short timeframe. Since the consensus on possible implementation strategies and methods is according to Lim et al. (2022) and Wittpahl (2020) still lacking, this thesis deals with the critical review of methods and approaches to introduce circular manufacturing (CM) at micro level with focus on manufacturing companies in the mechanical engineering sector.

The aim of the work is to identify and critically examine currently used methods and approaches for the introduction of circular manufacturing. The examination of the literature was carried out with the help of an extensive systematic literature review on the topic of "circular manufacturing". The theoretical basis is provided by the work of Tranfield et al. (2003). Based on more than 500 publications resulting of the search input including the inclusion criteria, the iterative exclusion procedure identified a total of 47 CM methods and approaches that are currently represented in the mechanical engineering sector according to the current state of research. To organize the results a coding framework was developed.

Given the inherent complexity of circular systems, the multi-criteria decision making (MCDM) method is used to assess the circularity of the identified CM methods and approaches. The selection of appropriate MCDM techniques is grounded in the meta-literature review of dos Santos Gonçalves and Campos (2022). Since, according to the current state of research, no work has yet addressed the evaluation of the circularity of CM methods and approaches, the developed evaluation method was submitted to an expert validation.

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | Einleitung | 3 |
| 1.1 | Ausgangssituation: Problemstellung und Problemdefinition | 3 |
| 1.2 | Forschungsfragen und Ziel der Arbeit | 4 |
| 1.3 | Verwendete Methodik und Vorgehensweise | 5 |
| 1.4 | Aufbau und Struktur der Arbeit | 6 |
| 2 | Theoretische Grundlagen..... | 7 |
| 2.1 | Einführung in das Themengebiet..... | 7 |
| 2.2 | Nachhaltigkeit..... | 10 |
| 2.2.1 | Politische Ziele und Entwicklung im Bereich Nachhaltigkeit | 10 |
| 2.2.2 | Das Konzept der nachhaltigen Entwicklung | 12 |
| 2.3 | Kreislaufwirtschaft | 15 |
| 2.3.1 | Konzeptionalisierung der Kreislaufwirtschaft | 15 |
| 2.3.2 | Der Weg von linearer zu zirkulärer Wertschöpfung..... | 20 |
| 2.3.3 | Einordnung der Kreislaufwirtschaft in die Nachhaltigkeitsdebatte..... | 22 |
| 2.3.4 | Umsetzung der Kreislaufwirtschaftsstrategie auf nationaler Ebene | 24 |
| 2.4 | Aktueller Bedarf und Forschungslücke | 26 |
| 3 | Verwendete Methoden | 27 |
| 3.1 | Systematische Literaturrecherche | 27 |
| 3.1.1 | Notwendigkeit einer systematischen Literaturrecherche | 27 |
| 3.1.2 | Theoretischer Hintergrund systematische Literaturrecherche | 29 |
| 3.2 | Bibliometrische Analyse | 32 |
| 3.3 | Multi-Criteria Decision Making Methode | 34 |
| 3.3.1 | Notwendigkeit einer multikriteriellen Bewertungsmethode | 34 |
| 3.3.2 | Theoretischer Hintergrund Multi-Criteria Decision Making Methode | 35 |
| 3.3.3 | Multi-Criteria Decision Making Framework | 37 |
| 4 | Systematische Literaturrecherche und bibliometrische Analyse | 42 |
| 4.1 | Planung und Durchführung der systematischen Literaturrecherche | 42 |
| 4.2 | Ergebnisse der deskriptiven Analyse..... | 47 |
| 4.3 | Ergebnisse der thematischen Analyse | 52 |
| 4.3.1 | Zusammenfassung | 54 |

| | | |
|-------|---|-----|
| 4.3.2 | Beschreibung der einzelnen Methoden..... | 58 |
| 4.4 | Zusammenfassung der Erkenntnisse | 75 |
| 5 | Bewertung der erhaltenen Ergebnisse | 78 |
| 5.1 | Sammlung der Daten..... | 78 |
| 5.2 | Extraktion der Messwerte | 82 |
| 5.3 | Kriteriengewichtung | 84 |
| 5.4 | Bewertung und Ranking | 85 |
| 6 | Validierung | 88 |
| 7 | Diskussion und Ausblick | 91 |
| 7.1 | Diskussion der Ergebnisse | 91 |
| 7.2 | Limitationen und Ausblick..... | 93 |
| 8 | Anhang..... | 95 |
| | Schlüsselwörter (Top 50) | 95 |
| | Fragebogen Validierung | 96 |
| 9 | Literaturverzeichnis | 106 |
| 10 | Abbildungsverzeichnis | 123 |
| 11 | Formelverzeichnis..... | 124 |
| 12 | Tabellenverzeichnis | 125 |
| 13 | Abkürzungsverzeichnis..... | 126 |

1 Einleitung

Vorangetrieben durch die Industrialisierung ist global ein progressiver Anstieg an Material- und Energiebedarf zu vernehmen, der weitreichende Folgen für das gesamte Ökosystem der Erde mit sich bringt. Der Anstieg der Erderwärmung hat fatale Auswirkungen zufolge, die von der Zunahme an Umweltkatastrophen, bis zum partiellen Verlust der Ökosystemleistungen reichen können, mit der Unfähigkeit der Erde, eine stabile Lebensgrundlage für die Menschheit zu bieten, einhergeht (WWF Deutschland, 2016). Dürreperioden, Lebensmittelknappheit, Flächenbrände, Süßwasserknappheit, ein enormer Anstieg an Klima-Migration sind nur einige der vielen Herausforderungen, mit denen die Menschheit in den nächsten Jahrzehnten zu kämpfen hat (Battisti and Naylor, 2009; Wallace-Wells, 2019). Einen erheblichen Einfluss zur übermäßigen Ausbeutung der natürlichen Ressourcen hat hierbei die verarbeitende Industrie, welche zu den Hauptverbrauchern von Material- und Energieressourcen zählt und für die Erzeugung einer beträchtlichen Menge an Abfall verantwortlich ist (WWF Deutschland, 2019).

1.1 Ausgangssituation: Problemstellung und Problemdefinition

Die aktuelle Wirtschafts- und Konsumweise folgt bislang zumeist einem linearen Prinzip, nach dem Ressourcen gewonnen, verarbeitet, genutzt und letztendlich großteils als Abfall entsorgt werden. Ein solches lineares Wirtschaftsmodell kann jedoch nur so lang funktionieren, so lang von einer unendlichen Nachfrage, aber gleichzeitig unendlicher Verfügbarkeit von Ressourcen ausgegangen wird. In der Realität steht jedoch der steigenden Nachfrage eine begrenzte Anzahl an Ressourcen gegenüber (BMK, 2020; Wilts and Fink, 2016).

Durch eine Entkopplung des Wirtschaftswachstums von dem materiellen Ressourcenverbrauch und der damit einhergehenden Steigerung der Ressourceneffizienz soll dieser Problematik entgegengewirkt werden. Diese Verbesserung der Ressourcenproduktivität ist nicht nur aus ökologischer Hinsicht notwendig, sondern kann angesichts der zunehmenden Volatilität der Rohstoffpreise auch ökonomische Vorteile für Unternehmen bieten. Eine essenzielle Rolle in diesem Zusammenhang nimmt die Kreislaufwirtschaft ein, welche eine absolute Reduktion der physischen Stoffströme und die damit verbundenen Umweltauswirkungen anvisiert (Wilts and Fink, 2016)

Trotz des wachsenden politischen Drucks, wie beispielsweise durch die Agenda 2030, in der 2015 der erste Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft verabschiedet wurde, stellt die Einführung zirkulärer Wertschöpfung eine große Herausforderung für die Industrie dar, dem ein kurzer Handlungszeitraum gegenübersteht. Ein erster wichtiger Schritt

zur nachhaltigen Industrietransformation ist die Verbesserung industrieller Produktionsprozesse, wobei der Konsens über mögliche Umsetzungsstrategien bzw. Methoden derzeit noch abgänglich ist (Lim et al., 2022; Wittpahl, 2020).

Auf Basis dessen soll sich die Arbeit mit der kritischen Betrachtung von Methoden und Ansätzen zur Einführung zirkulärer Wertschöpfung mit Fokus auf produzierende Unternehmen im Maschinenbausektor auseinandersetzen. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wird weiterführend die Einführung zirkulärer Wertschöpfung auf Produktionsebene mit dem englischen Begriff „Circular Manufacturing (CM)“ abgekürzt.

1.2 Forschungsfragen und Ziel der Arbeit

Wie Bjørnbet et al. (2021) in ihrem Werk zur Einführung zirkulärer Wertschöpfung in Produktionsunternehmen darlegen:

„Obwohl der Umfang der Literatur [im Bereich Kreislaufwirtschaft] deutlich zugenommen hat, gibt es noch Raum für weitere Grundlagenarbeit.“ (Bjørnbet et al., 2021)

Ziel der Arbeit ist es, derzeit verwendete Methoden und Ansätze zur Einführung zirkulärer Wertschöpfung zu ermitteln und diese kritisch zu durchleuchten. Untergeordnet wird dadurch versucht, einen Beitrag zur Grundlagenforschung im Bereich Kreislaufwirtschaft zu leisten. Das Forschungsvorhaben soll sich dabei auf den technischen Kreislauf, sowie einem Umsetzungsausmaß auf Mikroebene beschränken und den Fokus primär auf produzierende Unternehmen im Maschinenbausektor legen.

Auf Basis dessen lässt sich die Hauptforschungsfrage der Arbeit wie folgt ableiten.

F1: Welche Methoden und Ansätze zur Einführung der zirkulären Wertschöpfung auf Mikroebene sind, gemäß aktuellem Stand der Forschung, im Maschinenbausektor derzeit vertreten?

Zur näheren Untersuchung der Hauptforschungsfrage werden folgende Subforschungsfragen definiert.

F2: Welche Ein- und Ausschlusskriterien sind innerhalb der Literaturrecherche notwendig, um die Vollständigkeit der erhaltenen Suchergebnisse zu gewährleisten?

F3: Wie können die ermittelten CM Methoden und Ansätze, der Hauptforschungsfrage entsprechend, angemessen klassifiziert beziehungsweise kategorisiert werden?

F4: Wie kann die Kreislauffähigkeit der ermittelten CM Methoden und Ansätze bewertet werden?

1.3 Verwendete Methodik und Vorgehensweise

Die systematische Literaturrecherche (SLR) ist eine wissenschaftlich eigenständige Methode, die das Ziel verfolgt, relevante Literatur eines Forschungsthemas zu identifizieren und kritisch zu betrachten (F1). Dabei wird ein methodisches Vorgehen verfolgt, welches zu einer Reduktion der selektiven Literaturlauswahl beitragen soll und damit einhergehend die Reliabilität der Auswahl steigert.

Die theoretische Grundlage der, in dieser Arbeit, durchgeführten systematischen Literaturrecherche bietet das Paper „Towards a Methodology for Developing Evidence-Informed Management Knowledge by Means of Systematic Review“ von Tranfield et al. (2003). Das dabei vorgestellte methodische Vorgehen der SLR kann in drei Stufen unterteilt werden, an denen auch die vorliegende Arbeit anknüpft:

- Stufe 1: Planung des Reviews
- Stufe 2: Durchführung des Reviews
- Stufe 3: Berichterstattung und Dissemination

Wesentliche Schritte innerhalb der SLR, sind allen voran die Identifikation geeigneter Schlüsselwörter, die Verknüpfung dieser durch entsprechende Boolesche Operatoren, die Auswahl einer geeigneten Datenbank und die Ermittlung geeigneter Ein- und Ausschlusskriterien, um einer selektiven Auswahl entgegenzuwirken und damit die Vollständigkeit der erhaltenen Suchergebnisse zu gewährleisten (F2).

Nachdem die relevante Literatur identifiziert wird, erfolgt eine deskriptive bibliometrische und thematische Analyse der Ergebnisse, die Aufschluss über die Wahrnehmung und wissenschaftliche Publikationsleistung des Forschungsgebietes geben soll. Für die bibliometrische Analyse wird das Analysetool „Bibliometrix“ nach Aria und Cuccurullo (2017) herangezogen, welches durch die Verwendung der Programmiersprache R eine Integration zusätzlicher statistischen und grafischen Analysepaketen ermöglicht. Wesentlicher Bestandteil der thematischen Analyse ist die angemessene Klassifizierung bzw. Kategorisierung der ermittelten CM Methoden und Ansätze (F3).

Für die Bewertung der Kreislauffähigkeit der ermittelten Methoden und Ansätze wird ein „Multi-Criteria Decision Making (MCDM)“ Ansatz herangezogen. Als Ausgangspunkt hierfür dient das Paper „A systematic review for measuring circular economy with multi-criteria methods“ von dos Santos Gonçalves and Campos (2022), welches Aufschluss über derzeit gängige MCDM Methoden zur Messung von Kreislaufindikatoren bzw. -aspekten in Bezug auf unterschiedliche Systemperspektiven (micro, meso, macro) gibt. Auf Basis des Papers wird eine Kombination zweier multikriteriellen Entscheidungstechniken (TOPSIS und AHP) ausgewählt und abschließend die Bewertung durchgeführt (F4).

1.4 Aufbau und Struktur der Arbeit

Nachdem in diesem Kapitel die Ausgangssituation (Problemstellung und -definition), die Forschungsfragen und Zielsetzung sowie die verwendeten Methoden erläutert wurden, erfolgt im nachfolgenden Kapitel (Kapitel 2) die Beschreibung der theoretischen Grundlagen. Dazu wird zunächst ausgiebig in die Themenstellung eingeleitet, politische Ziele und Entwicklungen im Bereich Nachhaltigkeit erläutert und auf das Konzept der nachhaltigen Entwicklung eingegangen. Anschließend erfolgt die Konzeptionalisierung der Kreislaufwirtschaft. Um eine Einordnung der Kreislaufwirtschaft in die Nachhaltigkeitsdebatte zu ermöglichen, wird auf die Grundprinzipien dieser eingegangen, die den Weg von der linearen zur zirkulären Wertschöpfung ebnet. Danach erfolgt die Beschreibung der Kreislaufwirtschaftsstrategie auf nationaler Ebene. Die Wahl dieser Grundlagenthemen verfolgt das Ziel, darauf aufbauend den aktuellen Forschungsbedarf bzw. Forschungslücken abzuleiten. Kapitel 3 beschäftigt sich mit den verwendeten Methoden (SLR, Bibliometrische Analyse und MCDM), wobei auf die Notwendigkeit und den theoretischen Hintergrund der einzelnen Methoden eingegangen wird. Auf Basis dessen wird in Kapitel 4 das Vorgehen bei der durchgeführten SLR bzw. bibliometrischen Analyse sowie deren Ergebnisse beschrieben. Die Reihenfolge der Unterkapitel orientiert sich dabei am methodischen Vorgehen der SLR gemäß Tranfield et al. (2003). Kapitel 5 beschäftigt sich mit der Bewertung der erhaltenen Ergebnisse mit Hilfe der MCDM-Methode. Anschließend wird das entwickelte Bewertungsschema in Kapitel 6 validiert. Zum Abschluss erfolgt die Diskussion der Ergebnisse sowie die Anführung der Limitationen dieser Arbeit und ein kurzer Ausblick, vgl. Kapitel 7.

2 Theoretische Grundlagen

Das folgende Kapitel bietet die theoretische Grundlage dieser Arbeit und soll mit Hilfe von festgelegten Definitionen, Begriffen und Konzepten in das Themengebiet einleiten und den aktuellen Forschungsbedarf aufweisen.

2.1 Einführung in das Themengebiet

Vorangetrieben durch die Industrialisierung ist global ein progressiver Anstieg an Material- und Energiebedarf zu vernehmen, der weitreichende Folgen für das gesamte Ökosystem der Erde mit sich bringt. Der Anstieg der Erderwärmung hat fatale Auswirkungen zufolge, die von der Zunahme an Umweltkatastrophen, bis zum partiellen Verlust der Ökosystemleistungen reichen können und damit, mit der Unfähigkeit der Erde, eine stabile Lebensgrundlage für die Menschheit zu bieten, einhergeht (WWF Deutschland, 2016).

Der Vergleich der weltweiten Inanspruchnahme von biogenen, fossilen, metallischen und mineralischen Primärrohstoffen von 1900 bis zum Jahr 2009 zeigt, dass die auf vorindustrielle Gesellschaft Anfang des 20. Jahrhunderts mit 7 Mrd. t pro Jahr etwa ein Zehntel des Gesamtverbrauchs von 2009 (68 Mrd. t pro Jahr) aufweist. Bis 2060 soll dieser Wert zufolge der „Organisation for Economic Co-operation and Development“ (OECD) auf 167 Mrd. t pro Jahr steigen (Krausmann et al., 2009; OECD (Organisation for Economic Co-Operation and Development), 2019).

Während die vorindustrielle Gesellschaft eine auf Selbstversorgung aufbauende Wirtschaftsweise anstrebte, deren zentraler Bestandteil die Wiederverwertung von verwendeten Materialien war, kam es in den 1950er Jahren in den Industriestaaten der westlichen Welt zu einer Wende in der Wirtschafts- und Lebensweise der Bevölkerung. Einhergehend mit dem beschleunigten Wirtschaftswachstum dieser Zeit war eine exponentielle Zunahme an natürlichen Ressourcenverbräuchen zu vernehmen, bei der die Wiederverwertung von Materialien in den Hintergrund rückte. Eine Gegenüberstellung der entnommenen Ressourcen mit der globalen Weltbevölkerung zeigt, dass bereits Ende des 20. Jahrhunderts die Ressourcenverbräuche das weltweite Bevölkerungswachstum um ein Vielfaches überstiegen, wobei allen voran die westlichen Industriestaaten diesen Trend begünstigten (Fischer-Kowalski et al., 1997; Ladwig, 2003; Macqueen and Noetstaller, 1997; Pfister, 1996; Zemann, 1998).

Geprägt durch das Vorbild der westlichen Industriestaaten streben aktuell, gleichwohl Entwicklungs- und Schwellenländer, ein solches ressourcenintensives Konsumverhalten an, welches zu einer rasch wachsenden Belastung der Umwelt führt. Der originäre Ursprung der Umweltproblematik ist deshalb nicht ausschließlich im

steigenden Bevölkerungswachstum begründet, sondern vielmehr ein Resultat einer global rasant anwachsenden Mittelklasse, deren westliches ressourcenintensives Konsumverhalten einer begrenzten Anzahl an Ressourcen gegenübersteht. Nicht nur deshalb kann die Sicherung der Rohstoffversorgung als ein langfristiges Problem der modernen Konsumgesellschaft angesehen werden (Bilharz, 2006; Fischer-Kowalski et al., 2014; Steffen et al., 2015; Zemann, 1998).

Der beschleunigte Ge- und Verbrauch von Ressourcen hat gleichermaßen eine steigende Belastung der Umwelt zur Folge, die von Wasserknappheit, rasanten Umweltveränderungen bis hin zu globalen und lokalen steigenden Gesundheitsbelastungen durch Feinstaub reicht. Vorangetrieben durch die Nutzung fossiler Energieträger ist seit den 1950er Jahren eine große Beschleunigung innerhalb vieler unterschiedlicher Prozesse zu vernehmen, weshalb oftmals von der „Great Acceleration“ gesprochen wird. Auch in Österreich ist eine rasante Steigerung des Ressourcenverbrauchs zu vernehmen. Während der Materialverbrauch pro Jahr 1960 bei rund 100 Millionen Tonnen Material lag, wurden 2015 rund 160 Millionen Tonnen pro Jahr verbraucht, 2018 lag er bereits bei 167 Mt/Jahr. Da die Rohstoffentnahme und Produktion vielfach an anderen Orten stattfindet als der Endkonsum, tragen industrialisierte Länder wie Österreich für weltweite Ressourcenverbräuche und damit verbundene Umweltbelastungen Mitverantwortung. Durch eine örtliche und zeitliche Entkopplung des gefährdenden Potenzials der Umweltauswirkungen werden entstandene Schäden nicht allein von der verursachenden Industrie getragen, sondern auf die anderen Länder bzw. Generationen ausgelagert. Man spricht von der Externalisierung der entstandenen Umweltschäden. In der Ressourcennutzungsdebatte bedarf es deshalb neben einem Inlands-Indikator, wie der DMC („Domestic Material Consumption“), auch einen Indikator, der es ermöglicht, die Ressourcennutzung über die gesamten Produktions- und Lieferketten hinweg den Ländern der Endverwendung zuzuordnen. Eine Möglichkeit dafür ist der Material-Fußabdruck („Material Footprint“), kurz MF (Fischer-Kowalski et al., 2014; Krausmann et al., 2018; Statistik Austria, 2020; Steffen et al., 2015; Wiedmann et al., 2015).

Der aktuelle Ressourcen- bzw. Materialverbrauch in Österreich hat sich auf einem hohen Niveau eingependelt, wie der inländische Materialverbrauch (DMC) zeigt. Während der EU-Durchschnitt im Jahr 2018 bei rund 14 Tonnen pro Kopf lag, war der Materialverbrauch pro Kopf in Österreich bei rund 19 Tonnen. Damit übersteigt der Material-Fußabdruck (MF) Österreichs die Belastungsgrenzen der Erde um ein Vierfaches. Ein Vergleich der Veränderungsrate der Materialverbräuche (DMC und MF) zeigt, dass sich der inländische Materialverbrauch (DMC) im Zeitraum zwischen 2000 und 2015 leicht verbessert und damit reduziert hat, wohingegen der Material-Fußabdruck (MF) deutlich zugenommen hat, vgl. Abbildung 1 (BMK, 2020; Statistik Austria, 2020; Wiedmann et al., 2015).

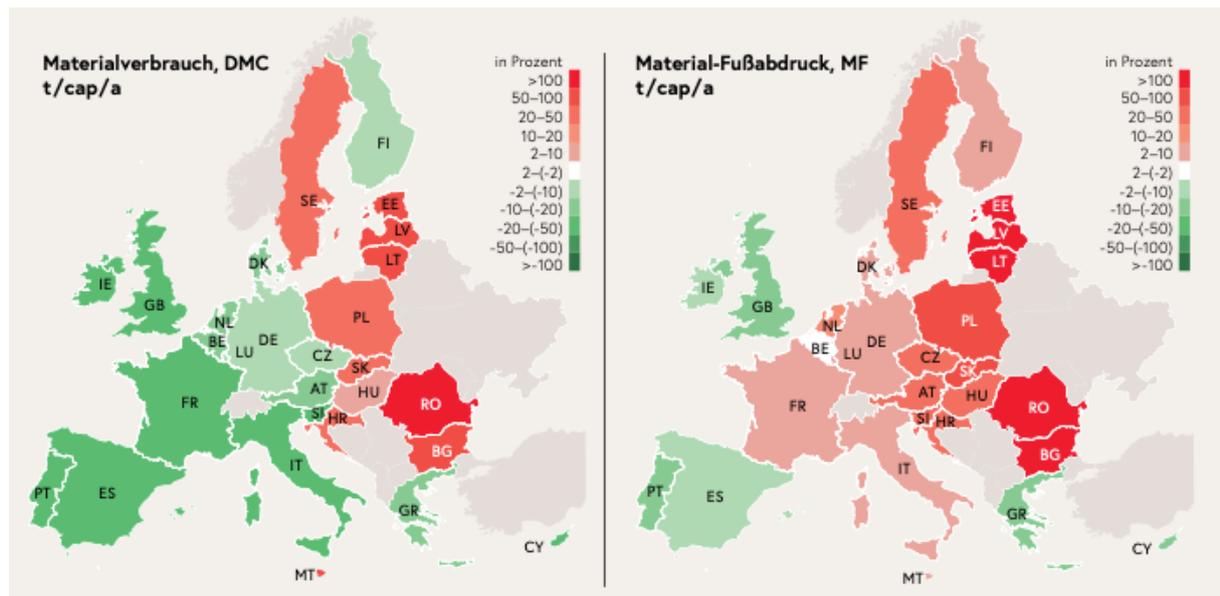


Abbildung 1: Änderung des Materialverbrauchs (DMC und MF) in der EU zwischen 2000 und 2015 (BMK, 2020)

Zur Identifizierung der Treiber des Ressourcenverbrauches ist eine Analyse sozio-ökonomischer Zusammenhänge nötig. Dazu wurde eine Dekompensationsanalyse des österreichischen Material-Fußabdrucks nach Bevölkerungsentwicklung, Wirtschaftswachstum, Veränderung der Importstruktur und Technologieeffekte durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, dass das wachsende Wirtschaftsoutput, gemessen als BIP pro Kopf, als treibende Kraft für die Erhöhung des Material-Fußabdrucks identifiziert werden kann. Da die Materialintensität im engen Zusammenhang mit dem CO₂-Fußabdruck steht, ist zudem eine starke Abhängigkeit der Erhöhung der CO₂-Emissionen vom österreichischen Wirtschaftswachstum zu vermerken (BMK, 2020; Plank et al., 2021; Stadler et al., 2018).

Durch eine Entkopplung des Wirtschaftswachstums von dem materiellen Ressourcenverbrauch und der damit einhergehenden Steigerung der Ressourceneffizienz soll dieser Problematik entgegengewirkt werden. Diese Verbesserung der Ressourcenproduktivität ist nicht nur aus ökologischer Sicht notwendig, sondern kann angesichts der zunehmenden Volatilität der Rohstoffpreise auch ökonomische Vorteile für Unternehmen bieten (Wilts and Fink, 2016).

Die aktuelle Wirtschafts- und Konsumweise folgt bislang überwiegend einem linearen Prinzip, nach dem Ressourcen gewonnen, verarbeitet, genutzt und letztendlich zumeist als Abfall entsorgt werden. Mit hohem Energieaufwand werden großteils Primär-Ressourcen gewonnen und in der Produktion veredelt, um anschließend nach der Nutzung entsorgt zu werden. Diese nachhaltigkeitsfremde Wirtschaftsweise entspricht einer Gesellschaft, die nach einer Steigerung des materiellen Wohlstands strebt und ein rasantes Konsumverhalten folgt, an das sich die Industrie angepasst

hat. Animiert durch immer kürzer werdende Produktlebenszyklen erfolgt der Wandel zur oftmals zitierten „Wegwerfgesellschaft“. Ein solches lineares Wirtschaftsmodell kann jedoch nur so lang funktionieren, so lang von einer unendlichen Nachfrage, aber gleichzeitig unendlicher Verfügbarkeit von Ressourcen ausgegangen wird. In der Realität steht der steigenden Nachfrage jedoch eine begrenzte Anzahl an Ressourcen gegenüber. Die Kreislaufwirtschaft, engl. Circular Economy (CE), soll hierbei Abhilfe schaffen und im Sinne des R-Frameworks (Refuse, Rethink, Reduce, Reuse, Repair etc.) zu einer Steigerung der Ressourceneffizienz beitragen und dabei den Spagat zwischen Umweltschutz und gleichzeitig das Festhalten am Paradigma des Wirtschaftswachstums ermöglichen (BMK, 2020; Wilts and Fink, 2016).

2.2 Nachhaltigkeit

2.2.1 Politische Ziele und Entwicklung im Bereich Nachhaltigkeit

Bereits in den 1970er Jahren rückte das Thema „Nachhaltigkeit“ mit der Studie „The Limits of Growth“ in den Fokus der Wissenschaft. Im Auftrag von „Club of Rome“, einer Vereinigung namhafter Industrieller, Wissenschaftler:innen und Politiker:innen, haben Wissenschaftler:innen des Massachusetts Institute of Technology (MIT) mittels Computersimulation die Wechselwirkung unterschiedlicher Trends, wie die fortschreitende Industrialisierung, die zunehmende Bevölkerungsdichte, die globale Unterernährung, die Ausbeutung der Rohstoffreserven, sowie die Zerstörung von Lebensräumen, mit dem Fortgang der Weltwirtschaft gekoppelt. Damit konnten eindringlich die negativen Auswirkungen wirtschaftlicher Entscheidungen veranschaulicht werden. Trotz wissenschaftlicher Kritik an der Aussagekraft der Studie wurde durch sie erstmals das Bewusstsein für die Endlichkeit von Ressourcen geschärft und damit einhergehend die Dringlichkeit für umweltpolitisches Handeln, welche sich noch im selben Jahr durch die erste Umweltkonferenz der Vereinten Nationen äußerte. 20 Jahre später, im Juni 1992, bekannte sich die internationale Staatengemeinschaft bei der UN-Konferenz „The Earth Summit“ in Rio de Janeiro schließlich zu den Grundsätzen der nachhaltigen Entwicklung und der Umweltvorsorge. Geprägt durch den Nachhaltigkeitsbegriff als Dreiklang zwischen wirtschaftlicher, gesellschaftlicher und umweltgerechter Entwicklung, forderte die Rio-Konferenz eine effiziente Nutzung von Energie und Rohstoffen sowie die Minimierung des Abfallaufkommens. Damit fiel der Startschuss für den internationalen Nachhaltigkeitsprozess („Rio-Prozess“), sowie bedeutende neue Verhandlungsstränge der globalen Umweltpolitik, beispielsweise mit der Agenda 21, Konventionen zu Klimaschutz und biologischer Vielfalt und der Rio-Deklaration (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, 1992; Mayer, 2017; Meadows et al., 1972; Ridder et al., 2007).

Nachdem im Jahr 2000 der Millenniumsgipfel stattfand, bei dem sich 189 UN-Mitglieds für die Millenniumserklärung mit ihren acht Millenniums-Entwicklungszielen (MDGs) aussprachen, folgte im Jahr 2002 der Weltgipfel für nachhaltige Entwicklungen (WSSD) in Johannesburg (Rio+10). Dabei wurde die Agenda 21 um den Johannesburg-Aktionsplan ergänzt, der weitere umsetzungsorientierte Handlungsempfehlungen, insbesondere im Bereich Globalisierung, Umwelt, Biodiversität, sanitäre Grundversorgung und Energie enthält. Damit konnte der Grundstein für einen zügigen Ausbau erneuerbarer Energieträger gelegt werden. Zehn Jahre später fand als Anknüpfung daran die Konferenz der Vereinten Nationen für nachhaltige Entwicklung (UNCSD) in Rio de Janeiro statt, welche auch als „Rio+20“ bezeichnet wird. Diese sollte aus europäischer Sicht die globale Transformation zu einer nachhaltigeren Wirtschaftsweise, Stichwort „Green Economy“, beschleunigen. Um diesen globalen Transformationsprozess voranzutreiben, wurden präzise Zielvorgaben benötigt, weshalb die Vereinten Nationen in der UNCSD einen Beschluss zur Erarbeitung von Nachhaltigkeitszielen, den sogenannten „Sustainable Development Goals“ kurz SDGs, fasste. Neben der universellen Geltung der Nachhaltigkeitsziele sollen zudem alle drei Dimensionen nachhaltiger Entwicklung (wirtschaftlich, gesellschaftlich und umweltgerecht) Berücksichtigung finden. Mit dem Auslaufen der Millenniums-Entwicklungszielen (MDGs) im Jahr 2015 wurde im „Post 2015-Prozess“ versucht, dem nachzugehen. Das Gipfeltreffen der Vereinten Nationen zur Festlegung der Post-2015-Entwicklungsagenda fand schließlich im September 2015 statt und wurde als hochrangige Plenarsitzung der Generalversammlung einberufen. Basierend auf den Millenniums-Entwicklungsziele (MDGS) wurde ein umfassender Kooperationsrahmen entwickelt, welcher politikgeleitet und handlungsorientiert ein Rahmenwerk für die globale nachhaltige Entwicklung über einen längeren Zeitraum hinweg geben sollte. Die SDGs sollen dabei die Leistungen und politischen Veränderungen der einkommensstarken Staaten abbilden und damit den Bedarf an grundlegenden politischen Veränderungen der OECD-Staaten betonen. (Annan, 2004; Vereinte Nationen (UN), 2012, 2015a).

Insgesamt 193 UN-Mitgliedstaaten bekannten sich im September 2015 zur Agenda 2030, einem Aktionsplan zur „Transformation unserer Welt“. Damit wird das UN-Umweltvorsorgeprogramm der Konferenz in Rio mit den politikgeleiteten Bestimmungen von Rio+20 vereint. In Zusammenarbeit mit Vertretern von Entwicklungs-, Schwellen- und Industrienationen wurde der UN-Aktionsplan, mit dem vollständigen Titel „Transformation unserer Welt: die Agenda 2030 für nachhaltige Entwicklung“, innerhalb des Verhandlungsprozesses erarbeitet und ist als globaler Plan zur Förderung nachhaltigen Friedens und Wohlstand und zum Schutz unseres Planeten einzuordnen. Mit den 17 Nachhaltigkeitszielen (SDGs) und den dazugehörigen 169 Unterzielen stellt die Agenda 2030 einen umfassenden Orientierungsrahmen zur Verwirklichung einer weltweiten nachhaltigen Gesellschaft dar, welcher als „Zukunftsvertrag der globalen Weltgemeinschaft des 21. Jahrhunderts“

anzusehen ist. Die Nachhaltigkeitsziele wurden nicht nur universell aufgestellt und sollen die ganze Welt betreffen, sondern sind gemäß Aktionsplan *„integriert und unteilbar und tragen den drei Dimensionen der nachhaltigen Entwicklung in ausgewogener Weise Rechnung“*, wobei die Umsetzung *„unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Realitäten, Kapazitäten und Entwicklungsstufen der einzelnen Länder“* stattfinden soll. Seit 2016 wird deshalb von allen Mitgliedsstaaten daran gearbeitet, diese Vision auf nationale Entwicklungspläne zu überführen, wobei ein besonderes Augenmerk auf die schwächsten Bevölkerungsgruppen und Länder gelegt wird, um die 17 Ziele bis 2030 zu erreichen (Vereinte Nationen (UN), 2015a, 2017, 2022).

Neben der Agenda 2030 fanden im Jahr 2015 zahlreiche weitere Gestaltungsmaßnahmen der internationalen Politik statt, darunter das Klimaschutzabkommen in Paris. In der UN-Klimakonferenz (COP21) wurde das Übereinkommen von seinerzeit 195 Mitgliedsstaaten der UNFCCC und der Europäischen Union verabschiedet. Ziel des völkerrechtlichen Vertrags ist es, den anthropogenen globalen Anstieg der durchschnittlichen Erdtemperatur auf deutlich unter 2°C und den Temperaturanstieg auf 1,5°C gegenüber dem vorindustriellen Niveau zu begrenzen. (Vereinte Nationen (UN), 2015b).

Wird diese Grenze nicht eingehalten, könnte der anthropogene Klimawandel dazu führen, dass Kippelemente im Erdklimasystem einen kritischen Schwellenwert, die sogenannten Kipp-Punkte (engl.: Tipping Points), überschreiten. Bereits eine geringe Veränderung im Klimasystem kann bewirken, dass Kipp-Punkte erreicht werden, welche starke nichtlineare Reaktionen in der internen Dynamik eines Teils des Klimasystems auslösen. Zu den Veränderungen gehören irreversible Prozesse und langfristige, starke Klimaänderungen, die mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht mehr umkehrbar sind. Diese drastischen Veränderungen des Klimas können nach heutigen wissenschaftlichen Kenntnissen verhindert werden, wenn es gelingt, die „2°C-Grenze“ einzuhalten, was wiederum die Notwendigkeit für politisches Handeln begründet (Deutsches Umweltbundesamt, 2008; Lenton, 2011; Wittpahl, 2020).

2.2.2 Das Konzept der nachhaltigen Entwicklung

Die moderne Konzeption des Nachhaltigkeitsbegriffs hat ihren Ursprung in der Forstwirtschaft. Obwohl der Gedanke eines nachhaltigen Wirtschaftens bereits im 15. Jahrhundert aufgekommen ist, geht die erstmalige Nennung auf Hans Carl von Carlowitz zurück. In der *„Sylvicultura Oeconomica“* beschreibt von Carlowitz 1713 den Mangel an Holz der Wälder infolge des Raubbaus. Holzsparmaßnahmen sollten in Kombination mit einer Veränderung der Waldbewirtschaftung zu einem „nachhaltenden“ Umgang mit dem Wald führen. Nachhaltigkeit ist folglich in seiner Grundstruktur bereits als ressourcen-ökonomisches Konstrukt verankert, welches eine

dauerhafte Aufrechterhaltung des Funktionsprinzips des Naturhaushaltes gewährleisten soll. Im engen Zusammenhang dazu steht der Ausdruck „nachhaltiger Entwicklung“ („Sustainable Development“), der eine starke politische Prägung durchlief und innerhalb zahlreicher Gestaltungsmaßnahmen der internationalen Politik aufgegriffen wurde. Während zu Beginn der Nachhaltigkeitsdebatte ein ökologisch-ökonomisch dominiertes Verständnis von Nachhaltigkeit vorherrschte, wurde dieses über die Verknüpfung umwelt- und entwicklungspolitischer Themen um die soziale Dimension erweitert. In der Internationalen Organisation für Normung (ISO) wird der Nachhaltigkeitsbegriff ebenfalls in diese drei Dimensionen unterteilt und Nachhaltigkeit als *„einen Zustand des Gesamtsystems, der die umweltbezogenen, sozialen und wirtschaftlichen Teilsysteme umfasst“*, angesehen. Obwohl Konsens im Leit- bzw. Wertebild nachhaltiger Entwicklung herrscht, handelt es sich um ein widersprüchliches Konzept, welches über einen vielseitigen Interpretationsspielraum verfügt und für spezifische Interessen instrumentalisierbar ist. So wird der Nachhaltigkeitsbegriff in der Literatur teilweise heute noch auf die ökologische Dimension reduziert und mit „Ökologie“ oder „Umweltschutz“ gleichgesetzt, ohne dabei die soziale Komponente zu berücksichtigen. (Geissdoerfer et al., 2017; Kleine, 2009; KU, 2014; Mauch, 2014).

Nach wie vor bestehen unterschiedliche Vorstellungen bezüglich der Definition des Nachhaltigkeitsleitbilds. Johnston et al. schätzte 2007, dass über 300 Definitionen von Nachhaltigkeit existieren. Das Drei-Säulen-Modell hat sich dabei sowohl bei einer Vielzahl an unterschiedlichen Akteuren in der Politik und Wirtschaft als auch innerhalb der Fachliteratur seit Mitte der 1990er Jahre weitestgehend durchgesetzt, weshalb in der vorliegenden Arbeit ein besonderer Fokus auf diesem Modell liegt. Es ist jedoch darauf hinzuweisen, dass neben diesem Modell eine Vielzahl weiterer Konzepte zur Definition des Nachhaltigkeitsbegriffes bestehen. Um einen Überblick über die unterschiedlichen Definitionen und Modellen zu erhalten, ist beispielsweise auf das Paper „A state-of-the-art of industrial sustainability: definitions, tools and metrics“ von Arena et al. zu verwiesen, in dem eine Vielzahl an Nachhaltigkeitsdefinitionen und -konzepte gesammelt und analysiert werden. Auf Basis der Analyse können die drei Dimensionen gemäß Arena et al. in weitere Subdimensionen unterteilt werden. So lässt sich die ökologische Nachhaltigkeit beispielsweise in Material, Energie, Wasser, Biodiversität, Emissionen, Abfall, Produkt und Service, Konformität und Transport unterteilen (Arena et al., 2009; Geissdoerfer et al., 2017; Kleine, 2009).

Das Drei-Säulen-Modell ist ein historisch gewachsener Ansatz, der keinem einzelnen Autor eindeutig zuordenbar ist. Die drei Säulen (Ökonomie, Ökologie und Soziales) sind als Handlungsbereich für die Umsetzung der nachhaltigen Entwicklung zu betrachten. Zur inhaltlichen und quantitativen Konkretisierung der nachhaltigen Entwicklung kann auf das Kapitalkonzept zurückgegriffen werden, das in den 1970er Jahren eingeführt wurde. Demzufolge können die drei Säulen als unterschiedliche Kapitalarten aufgefasst werden, wobei das „Kapital“ neben der monetären Einheit

(Ökonomie) auch physikalische (Ökologie) und zeitliche bzw. qualitative Größen (Soziales) enthalten kann. Das ökologische Kapital umfasst den Bestand an erneuerbaren Ressourcen, Grundfläche innerhalb des Ökosystems, sowie Nahrungskreisläufe, Klimasysteme, Tragfähigkeiten, Gleichgewichte und solare Einstrahlung, und wird vom sogenannten „Naturkapital“ eingeschlossen. Das wirtschaftliche Produktionskapital wird in Form von Sach-, Wissens- und Humankapital innerhalb des ökonomischen Kapitals abgebildet. Durch die Monetarisierbarkeit einzelner Komponenten des ökonomischen Kapitals kann diese Kapitalart am ehesten bestimmt bzw. gemessen werden. Wesentlich komplizierter abzugrenzen ist das Sozialkapital, welches durch die normativen Eigenwerte seiner instrumentellen Funktionen subjektiver Natur ist. Dieser immaterielle Ansatz umfasst die menschlichen Beziehungen zum Vorteil der beteiligten Individuen. Damit beinhaltet das Sozialkapital Funktionen zur Befriedigung der Grundbedürfnisse, Förderung gesellschaftlicher Integration und Weiterentwicklung der Gesellschaft. Aufgrund der zahlreichen Überschneidungen innerhalb der Kapitalarten ist eine eindeutige Zuordnung nicht immer möglich. So kann beispielsweise Humankapital aufgrund seiner wirtschaftlichen Effekte nicht nur als soziales Kapital aufgefasst werden, sondern gleichwohl als ökonomischen Kapital. Aufgrund dessen sollte in gewissen Fällen auf eine stärker differenzierte Berücksichtigung der relevanten Dimensionen zurückgegriffen werden. In diesem Zusammenhang ist insbesondere auf das Buch „Operationalisierung einer Nachhaltigkeitsstrategie“ von A. Kleine (2009) zu verweisen. (Kleine, 2009; Kopfmüller et al., 2001; Pfister, 2002; Putnam, 1993; SRU, 2002; Tremmel, 2003; von Hauff, 2007).

Zur grafischen Repräsentation der drei Nachhaltigkeitssäulen kann auf unterschiedliche Darstellungen zurückgegriffen werden. Ein weit verbreiteter Ansatz ist dabei die Darstellung mittels gleichseitigen Nachhaltigkeitsdreiecks, welches auf dem Grundsatz beruht, dass jede Säule gleichberechtigt existiert. Eine andere Möglichkeit, die drei Dimensionen der Nachhaltigkeit und damit das Konzept der nachhaltigen Entwicklung abzubilden, ist mittels eines Säulen-Modells, bei dem die „Nachhaltige Entwicklung“ von den drei Säulen getragen wird. Beim Schnittmengen-Modell werden dagegen drei Kreise, die jeweils eine der Säulen repräsentieren, übereinandergelegt. Dadurch können Überschneidungen, die sich zwischen den Säulen ergeben, wie am Beispiel des Humankapital, besser dargestellt werden. Aktuell gibt es eine Hand voll Weiterentwicklungen der angeführten Modelle, wie zum Beispiel das integrierte Nachhaltigkeitsdreieck, welches eine eindeutigere Zuordnung der Nachhaltigkeitsdimensionen ermöglichen soll. An dieser Stelle ist erneut auf das Werk von A. Kleine (2009) zu verweisen (Kleine, 2009).

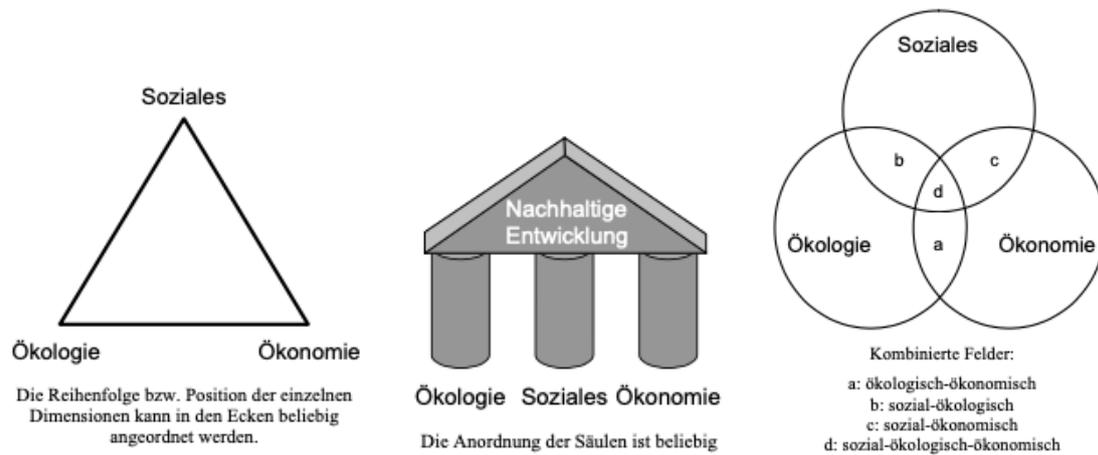


Abbildung 2: Vergleich unterschiedlicher Darstellungsformen der Nachhaltigkeitsdimensionen (Rechts: Dreiecksmodell, Mitte: Säulen-Modell, Links: Schnittmengenmodell) (Kleine, 2009)

2.3 Kreislaufwirtschaft

2.3.1 Konzeptionalisierung der Kreislaufwirtschaft

Das Konzept der Kreislaufwirtschaft (Circular Economy, kurz CE) kann als eine Operationalisierung für Unternehmen zur Umsetzung des Konzepts der nachhaltigen Entwicklung angesehen werden, und trifft nicht zuletzt deshalb auf großes Interesse in der Wissenschaft und Praxis. Obwohl auch andere Modelle, wie das Konzept der „Green Economy“ oder das „Green Growth“ Konzept, herangezogen werden, um die nachhaltige Entwicklung von Unternehmen zu operationalisieren, erfährt das CE-Konzept derzeit wohl die größte Resonanz (Ghisellini et al., 2016; Murray et al., 2017; OECD, 2016; UNEP, 2011).

Diese Tendenz bilden gleichwohl aktuelle Entwicklungen in der Forschung ab. So weist die Untersuchung der Anzahl an Publikationen pro Jahr innerhalb der Datenbank „Scopus“ im Bereich Kreislaufwirtschaft einen annähernd exponentiellen Verlauf auf, vgl. Abbildung 3.

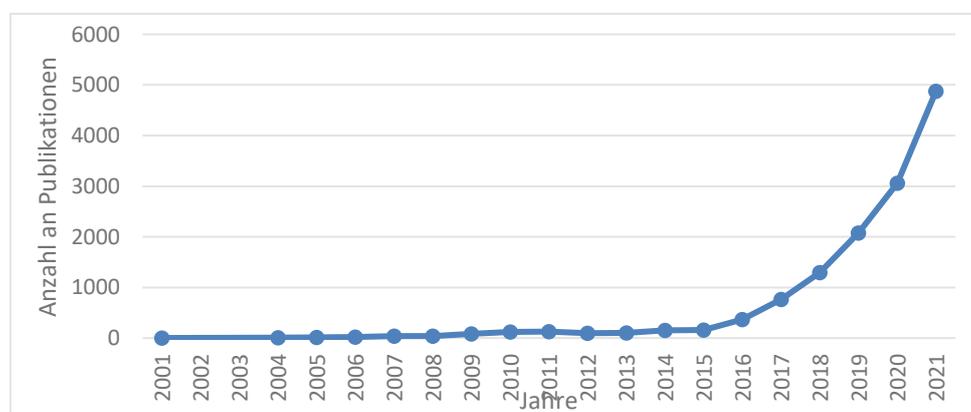


Abbildung 3: Anzahl der jährlichen Publikationen im Bereich Kreislaufwirtschaft (Datenquelle: Scopus 2001-2021)

In Analogie zum Nachhaltigkeitsbegriff ist auch bei der Kreislaufwirtschaftsthematik eine breite Masse an möglichen Definitionen zu finden. So weist Yuan et al. bereits 2006 darauf hin, dass „keine allgemein anerkannte Definition von [CE]“ zu finden ist (Yuan et al., 2006). Um Transparenz über das derzeitige Verständnis des Konzepts der CE zu schaffen, wird im nachfolgenden Abschnitt das Paper „Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions“ von Kirchherr et al. aus dem Jahr 2017 herangezogen. Mit Hilfe einer systematischen Analyse von 114 Definitionen des Begriffes Kreislaufwirtschaft versuchen die Autoren, einen Beitrag zur Kohärenz des Konzepts der Kreislaufwirtschaft zu leisten. Da die systematische Bewertung von Definitionen gemäß Bourque (2004) einen Kodierungsrahmen erfordert, wird innerhalb des Papers ein solcher Rahmen entwickelt. Dieser soll Aufschlüsse darüber geben, wie sich die Umwandlung von verbalen oder visuellen Daten in numerische Daten realisieren lässt. Die dabei herangezogenen Kodierungsdimensionen werden nachfolgend diskutiert (Bourque, 2004; Kirchherr et al., 2017; Yuan et al., 2006).

Die Kodierungsdimensionen der Kreislaufwirtschaft können zufolge Kirchherr et al. (2017) in drei Kategorien (Grundprinzipien, Ziele und Befähiger) unterteilt werden. Innerhalb der Grundprinzipien können zwei Arten unterschieden werden: Prinzipien, die sich auf das R-Rahmenwerk beziehen, und die Systemperspektive (Kirchherr et al., 2017).

Obwohl das R-Rahmenwerk keinem eindeutigen literarischen Ausgangspunkt zuzuordnen ist, wird es in der Wissenschaft und Praxis bereits seit Jahrzehnten herangezogen. Es fungiert als Abbild der wichtigsten Maßnahmen zur Erreichung des Ziels, die Bedürfnisse der Gesellschaft durch optimierte und effiziente Nutzung von Ressourcen zu decken. Die Abfallhierarchie der EU steht dabei gemäß Zhang et al. (2022) im engen Zusammenhang mit dem R-Rahmenwerk der Kreislaufwirtschaft. Von dem Gesichtspunkt der Lebenszyklusperspektive wird sowohl bei der Abfallhierarchie als auch das R-Rahmenwerk der Kreislaufwirtschaft der gesamte Lebenszyklus eines Produktes herangezogen, einschließlich der „Pre-Use“, „Use“ und „Post-Use“ Phasen. In den vergangenen Jahren kristallisierte sich in der Literatur die Tendenz heraus, dass der Schwerpunkt auf der Gestaltung („Pre-Use Phase“) und Nutzung („Use Phase“) eines Produkts und nicht in der Verwertung von Abfällen liegen sollte, um das Abfallaufkommen bereits vor der Entstehung zu reduzieren, vgl. Abbildung 4. Aufgrund dessen orientieren sich Abfallhierarchie und Kreislaufwirtschaft an der Philosophie, eine Reduktion der Abfälle bereits vor Beginn der Produktion durch Umdenken (Rethink), Neugestaltung (Redesign) und Wiederverwendung (Repurpose) zu erreichen. Rohstoffe sollen möglichst umweltfreundlich gewonnen werden und innerhalb der Produktion soll ein schonender Umgang mit den Ressourcen berücksichtigt werden. Zeitgleich sollte innerhalb des Produktdesigns darauf geachtet werden, die Lebensdauer der Produkte zu maximieren und deren Nutzung zu intensivieren, um dem Ziel einer Minimierung der Ressourcenverbräuche sowie des

Abfallaufkommens näherzukommen. Da eine vollständige Vermeidung aller Abfälle nicht realisierbar ist, soll während bzw. nach der Nutzungsphase auf unterschiedliche Verwertungskategorien zurückgegriffen werden, die die Ressourceneffizienz optimieren (Kirchherr et al., 2017; Kranert, 2017; Zhang et al., 2022)

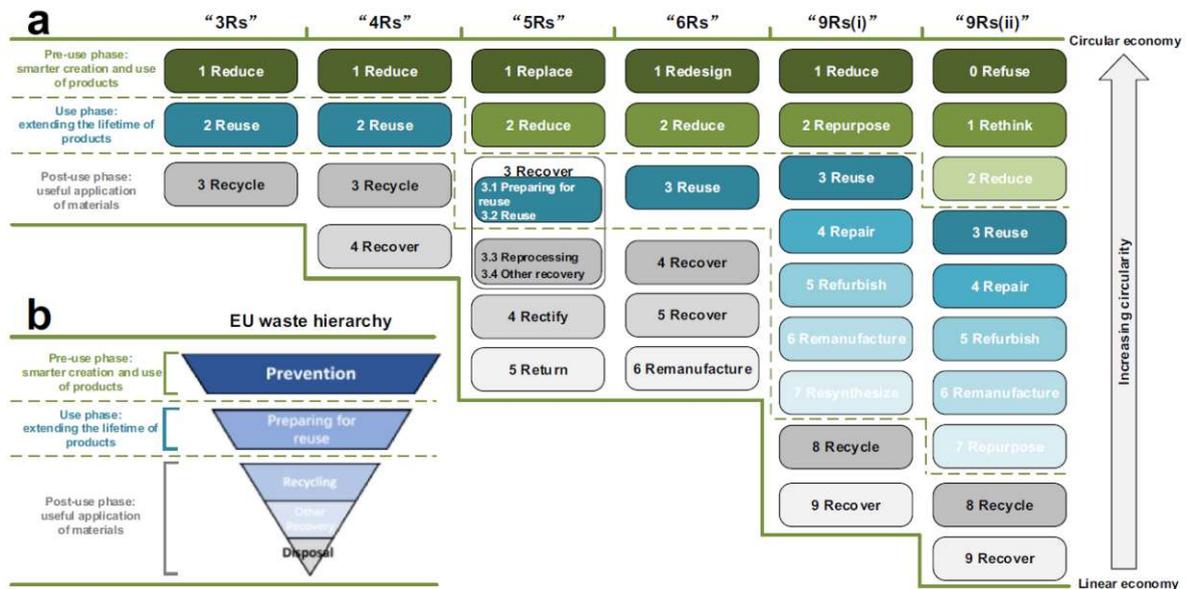


Abbildung 4: Vergleich zwischen dem (a) R-Framework der Kreislaufwirtschaft und der (b) Abfallhierarchie (Zhang et al., 2022)

In der Literatur wird Kreislaufwirtschaft im Sinne des R-Rahmenwerks primär durch drei Hauptmaßnahmen, die „3R-Regel“ (Reduce, Reuse, Recycle), beschrieben, welche auch in der Politik vielseitig Anwendung findet. Beispielsweise in den Gesetzen zur Förderung der Kreislaufwirtschaft der Volksrepublik China vom Jahr 2008. Nachdem der Gestaltung („Pre-Use Phase“) und Nutzung („Use Phase“) von Produkten eine verstärkte Aufmerksamkeit innerhalb der Literatur und Politik zukam, wurde der R-basierte Kreislaufwirtschaftsrahmen im Laufe der Zeit sukzessive erweitert. So wurde 2008 „Recover“ als viertes R innerhalb der Abfallrichtlinien der Europäischen Union eingeführt und bildet seither den Kern dieser. Innerhalb der Wissenschaft wurden über den 4R-Rahmen hinausgehenden, weitere R-Rahmen vorgeschlagen, wie zum Beispiel der 6R-Rahmen gemäß Sihvonen und Ritola (2015) oder den 9R-Rahmen gemäß van Buren et al. (2016) bzw. Potting et al. (2017). Auf nationaler Ebene wird innerhalb Österreichs auf einen 9R-Rahmen zurückgegriffen, welcher in Kapitel 2.3.3 näher erläutert wird (BMK, 2021; Kirchherr et al., 2017; PRC, 2008; Zhang et al., 2022).

Die Gemeinsamkeit aller Varianten der R-Rahmenwerke ist die Tatsache, dass die Auflistung der R's einer Hierarchie folgt, bei dem das erste R über dem Zweiten, das Zweite über dem Dritten usw. zu priorisieren ist. Grundgedanke dieser Überlegung ist das sogenannte „Cradle-to-Cradle“ (C2C) Konzept, auf das sich das Prinzip der Kreislaufwirtschaft stützt. Gemäß McDonough und Braungart (2002) sollten

Materialien zufolge des C2C-Designs nicht als Abfallproblem betrachtet werden, wie beim "Cradle-to-Grave" Konzept, sondern auf geschlossenen Nährstoffkreisläufen beruhen, bei denen jegliches Aufkommen von Abfällen zu vermeiden ist. In Analogie zur Natur zielt das C2C-Konzept folglich darauf ab, Gebäude, Gemeinschaften bzw. Systeme zu schaffen, die sich durchwegs positiv auf die Gesundheit des Menschen und seine Umwelt auswirken. Dabei fließen Nährstoffe und Energie in einen geschlossenen Kreislauf, in dem der Abfall des einen Organismus als Nahrung für einen anderen fungiert. Gemäß Braungart und McDonough (2002) ist Abfall folglich gleich Nahrung („Waste equals food“), ein zentraler Gedanke der Kreislaufwirtschaft, der durch die unterschiedlichen R's ausgedrückt wird. Da Recycling gemäß Braungart und McDonough (2009) in den meisten Fällen Downcycling ist, wodurch die Qualität des Materials eine sukzessive Minderung über die Zeit erfährt, schlagen die Autoren vor, grundlegende Prozesse bereits in der Gestaltungs- bzw. Nutzungsphase zu überdenken, anstatt Recycling und damit eine Abfallhierarchie anzustreben (Charter and Tischner, 2017; Kirchherr et al., 2017; McDonough and Braungart, 2002).

Gemäß Kirchherr et al. ist die Systemperspektive als zweites Grundprinzip der Kreislaufwirtschaft zu verstehen, das bereits in frühen Werken zur CE aufgegriffen wurde, beispielsweise bei Davis und Hall (2006) und Zhijun und Nailing (2007). Demzufolge kann Kreislaufwirtschaft als eigenständiges System aufgefasst werden, welches einer grundlegenden Veränderung, anstelle einer schrittweisen Anpassung des derzeitigen Systems, bedarf. Eine Vielzahl an Autoren, darunter Fang et al. (2007), Sakr et al. (2011) und Jackson et al. (2014), argumentieren, dass der Übergang zur Kreislaufwirtschaft auf drei Ebenen zu erfolgen hat, welche als die drei Ebenen des CE-System interpretiert werden können: Die Makro-, Meso- und Mikroebene. Während innerhalb der Makrosystem-Perspektive die Notwendigkeit hervorgehoben wird, die industrielle Struktur und Zusammensetzung der gesamten Wirtschaft zu verändern, legt die Perspektive des Mesosystems den Fokus auf Öko-Industrieparks als System. Okkasionell wird die Makroebene auch als „nationale/globale Ebene“, die Mesoebene als „regionale Ebene“ bezeichnet, vgl. Li et al. (2010) oder Geng et al. (2009). Dagegen betrachtet die Mikrosystem-Perspektive in der Regel Produkte bzw. einzelne Unternehmen und deren Konsumenten (Jackson et al., 2014; Kirchherr et al., 2017; Li et al., 2010; Sakr et al., 2011; Zhijun and Nailing, 2007).

Nachdem die beiden Grundprinzipien der Kreislaufwirtschaft gemäß Kirchherr et al. dargelegt wurden, werden nachfolgend die Ziele der Kreislaufwirtschaft diskutiert. Zuzufolge zahlreicher Quellen, wie der Europäischen Umweltagentur (2016), der Ellen MacArthur Foundation (2013), Ghisellini et al. (2016) und vielen weiteren, wird die nachhaltige Entwicklung häufig als Hauptziel der Kreislaufwirtschaft angesehen. Grundsätzlich kann Kreislaufwirtschaft als Leitbild für nachhaltige Entwicklung erachtet werden, um alle drei Säulen der Nachhaltigkeit zeitgleich zu adressieren. Im Bericht „Our Common Future“ der WCED (1987), der nachweislich den Begriff „Nachhaltige

Entwicklung“ prägte, wird die generationenübergreifende Komponente der drei nachhaltigen Entwicklungsziele besonders betont. So wird argumentiert, dass ein Ziel sein sollte, alle drei Dimensionen der Nachhaltigkeit zu erreichen, ohne künftige Generationen zu gefährden (Ellen MacArthur Foundation, 2013; Kirchherr et al., 2017; WCED, 1987)

Gemäß Brennan et al. (2015) oder der Ellen MacArthur Foundation (2013) erfordert die Kreislaufwirtschaft neuartige Geschäftsmodelle, weshalb sie laut Kirchherr et al. (2017) als eine der „Enabler“ (Befähiger) der Kreislaufwirtschaft zu sehen sind. Darüber hinaus wird in einigen Werken der Konsument als zweiter Befähiger der CE verstanden. Nähere Details dazu finden sich im Paper „Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions“ von Kirchherr et al. (2017). Ein Überblick über den von Kirchherr et al. (2017) vorgestellten Kodierungsrahmen, und damit über die erörterten Grundprinzipien, Ziele und Befähiger der Kreislaufwirtschaft, findet sich in Abbildung 5 (Ellen MacArthur Foundation, 2013; Kirchherr et al., 2017).

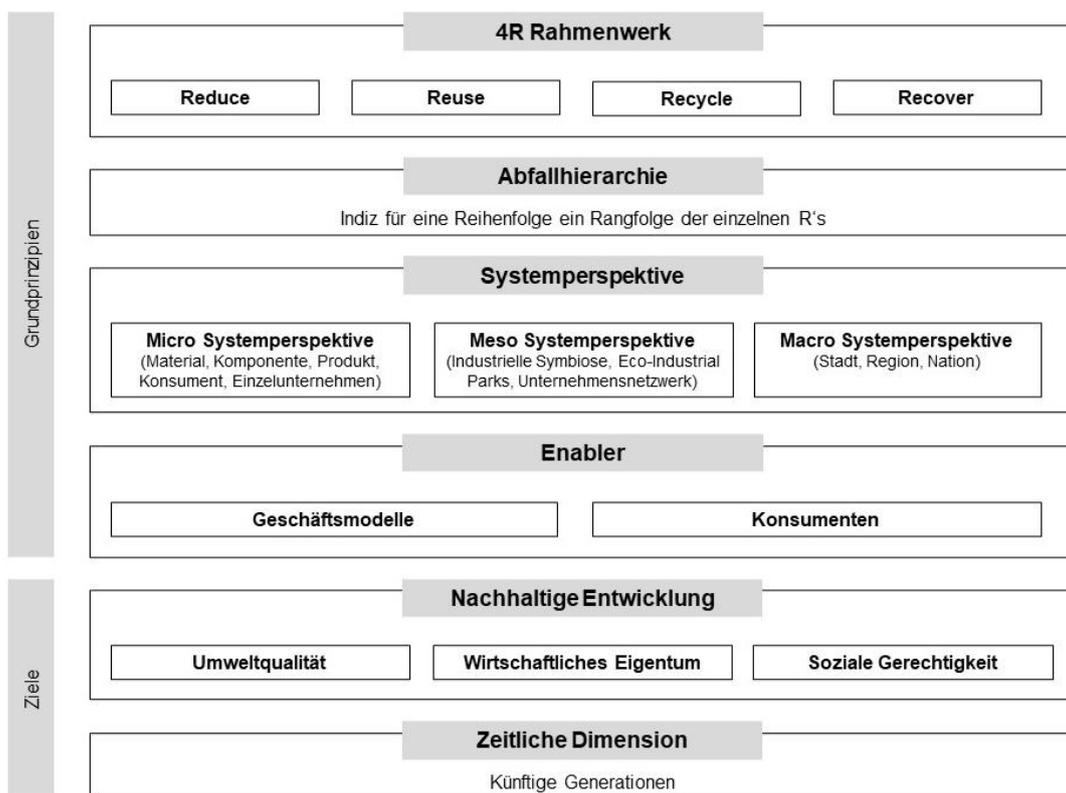


Abbildung 5: Überblick über die Grundprinzipien, Ziele und Befähiger der Kreislaufwirtschaft (vgl. Kirchherr et al., 2017)

Auf Basis von 17 Kodierungsdimensionen werden in der Publikation von Kirchherr et al. (2017) 114 Definitionen analysiert und darauf aufbauend eine eigene CE-Definition aufgestellt. Zuzufolge der Autoren soll diese als Zusammenfassung des Kodierungsrahmens verstanden werden und nicht als endgültige Definition. Das CE-Konzept soll als Konstrukt angesehen werden, welches im Diskurs mit

unterschiedlichen Akteuren entwickelt wird. Dies impliziert, dass „*obwohl sich unter den verschiedenen Akteuren in diesem Bereich ein gewisser Konsens abzeichnet, besteht nach wie vor Unklarheit darüber, was "Kreislaufwirtschaft" in der Praxis tatsächlich bedeutet*“ (Gladek, 2019), weshalb die Analyse des CE-Verständnisses, zumindest teilweise, als subjektiv zu erachten ist (Gladek, 2019; Kirchherr et al., 2017).

Da aktuell eine Vielzahl an unterschiedlichen Definitionen des Begriffs Kreislaufwirtschaft kursiert, diese jedoch unterschiedlich auf die einzelnen Grundprinzipien der Kreislaufwirtschaft eingehen, wird nachfolgend die Definition von Kirchherr et al. (2017) aufgegriffen. Diese soll nicht nur Transparenz hinsichtlich des aktuellen CE-Verständnis schaffen, sondern, wie einleitend erwähnt, gleichwohl einen Beitrag zur Kohärenz des Konzepts der Kreislaufwirtschaft leisten. Die Autoren weisen jedoch darauf hin, dass das vorgestellte CE-Verständnis, aufgrund seiner eingeschränkten Betrachtung von ausschließlich 17 Dimensionen, möglicherweise nicht breit genug gefasst worden ist. Zudem ist zu beachten, dass die herangezogenen qualitativen Definitionen durch die systematische Analyse innerhalb des Kodierungsrahmens quantifiziert wurden, weshalb die Ergebnisse dieser vereinfacht und damit, zumindest teilweise, verzerrt sind. Diesen Tatsachen zugrunde liegend, soll auch in dieser Arbeit die Subjektivität der nachfolgenden CE-Definition erneut betont werden (Kirchherr et al., 2017).

Nach Kirchherr et al. (2017) kann Kreislaufwirtschaft wie folgt definiert werden:

"Eine Kreislaufwirtschaft beschreibt ein Wirtschaftssystem, das auf Geschäftsmodellen basiert, die das 'End-of-Life' Konzept durch die Reduzierung, die Wiederverwendung, das Recycling und die Rückgewinnung von Materialien in Produktions-/Vertriebs- und Verbrauchsprozessen ersetzen und somit auf der Mikroebene (Produkte, Unternehmen, Verbraucher), der Mesoebene (Öko-Industrieparks) und der Makroebene (Stadt, Region, Nation und darüber hinaus) operieren, mit dem Ziel, eine nachhaltige Entwicklung zu erreichen, die die Schaffung von Umweltqualität, wirtschaftlichem Wohlstand und sozialer Gerechtigkeit zum Nutzen der heutigen und zukünftiger Generationen beinhaltet." (Kirchherr et al., 2017)

2.3.2 Der Weg von linearer zu zirkulärer Wertschöpfung

Nachdem im vorhergehenden Abschnitt die Konzeptionalisierung des Kreislaufwirtschaft behandelt wurde, soll in diesem Kapitel auf die Grundprinzipien der Kreislaufwirtschaft eingegangen werden, die den Weg von der linearen zur zirkulären Wertschöpfung ebnet. Basis dafür ist das Werk „Towards the Circular Economy“ der Ellen MacArthur Foundation (EMF) aus dem Jahr 2010. Die Stiftung wurde im Jahr 2010 gegründet, um laut eigenen Angaben „*die Generation zum Umdenken, zur Neugestaltung und zum Aufbau einer positiven Zukunft zu inspirieren*“. Zuzufolge

diverser Autoren, darunter Kurt et al. (2021), Kirchherr et al. (2017) oder Walcher und Leube (2017), ist die EMF federführend an der Verbreitung des CE-Konzept beteiligt und fungiert als angesehen Referenz in diesem Bereich (Kirchherr et al., 2017; Kurt et al., 2021; Walcher and Leube, 2017). Dieser Tatsache zugrunde liegend wird die EMF in dieser Arbeit als primäre Quelle zur Beschreibung der CE-Grundprinzipien herangezogen.

Die aktuelle Wirtschafts- und Konsumweise folgt bislang zumeist dem linearen „take-make-dispose“ Modell, nach dem Ressourcen gewonnen, verarbeitet, genutzt und letztendlich größtenteils als Abfall entsorgt werden. Bemühungen einzig und allein die Effizienz von Produktionsunternehmen zu steigern, wird gemäß EMF (2013) jedoch nicht zu einer langfristigen Lösung des Problems beitragen, sondern die Probleme lediglich zeitlich versetzen, weshalb eine Änderung des gesamten Betriebssystems notwendig scheint (Ellen MacArthur Foundation, 2013).

Das Konzept der Kreislaufwirtschaft stützt sich auf Untersuchungen nicht linearer Systeme, in denen nicht einzelne Komponenten des Systems, sondern das System an sich zu optimieren ist, wobei stark zwischen dem Verbrauch und Gebrauch von Materialien differenziert wird. Das Modell der Kreislaufwirtschaft stützt sich auf ein „funktionales Dienstleistungsmodell“, bei dem Hersteller oder Einzelhändler zunehmend Eigentümer ihrer Produkte sind und, soweit möglich, als Dienstleistungserbringer fungieren, welche die Nutzung von Produkten und nicht das Produkt selbst offerieren. Diese Wandlung, die in der Fachliteratur unter dem Begriff „Servization“ angeführt wird (Howard et al., 2022; Neramballi et al., 2020), adressiert unmittelbar unterschiedliche Pain Points des linearen Wirtschaftsmodells. So wird damit die Entwicklung eines effizienten und effektiven Rücknahmesystems, Stichwort Rückführlogistik, sowie die Ausarbeitung neuer Geschäftsmodelle befähigt, die wiederum langlebigere Produkte hervorbringen und die Demontage und Wiederaufbereitung erleichtert (Ellen MacArthur Foundation, 2013).

Zufolge der EMF beruht das Konzept der Kreislaufwirtschaft auf fünf Grundprinzipien:

- **Abfall vermeiden:** Abfall entsteht nicht, wenn die biologischen und technischen Komponenten eines Produktes so konzipiert werden, dass sie in den biologischen und technischen Materialkreislauf zurückgeführt werden. Dabei ist auch auf ihre Demontagefähigkeit zu achten. Biologische Bestandteile sollen ungiftig sein und eine einfache Kompostierung ermöglichen. Technische Bestandteile (Polymere, Legierungen, künstlich hergestellte Materialien) sind so zu gestalten, dass sie mit minimalem Energieaufwand und der Aufrechterhaltung der höchsten Qualität wiederverwendet werden können (Ellen MacArthur Foundation, 2013).

- **Resilienz durch Vielfalt schaffen:** Modularität, Vielseitigkeit und Anpassungsfähigkeit sind Eigenschaften von Systemen, denen Vorrang eingeräumt werden muss, um auf die sich ständig ändernden Umweltbedingung reagieren zu können. Zuzolge Michael Braungart (2002) legt die industrielle Revolution und Globalisierung den Fokus auf Uniformität, was eine Instabilität hervorrufen kann. Deshalb postuliert der Wissenschaftler, sich am Vorbild natürlicher Systeme zu orientieren, die sich an ihre Umwelt mit einer unendlichen Vielfalt an Diversität, Uniformität und Komplexität anpassen (Ellen MacArthur Foundation, 2013; McDonough and Braungart, 2002).
- **Auf Energie aus erneuerbaren Quellen zurückgreifen:** Die Systeme sollten auf den Einsatz erneuerbarer Energieträger ausgerichtet sein. Wie das Windunternehmen Vestas beschreibt: Jeder Einführungsprozess zirkulärer Wertschöpfung sollte damit beginnen, die im Produktionsprozess eingesetzte Energie zu untersuchen (Ellen MacArthur Foundation, 2013).
- **Denken in Systemen:** Wie einleitend argumentiert ist das Systemdenken ein essenzieller Baustein der Kreislaufwirtschaft. Darunter wird die Fähigkeit verstanden, zu verstehen, wie sich Teile innerhalb eines Ganzen gegenseitig beeinflussen, wobei die Beziehung der Teile und des Ganzen entscheidend ist. Elemente sind mit ihrer Infrastruktur, ihrer Umgebung und ihrem sozialen Kontext in Beziehung zu setzen (Ellen MacArthur Foundation, 2013).
- **„Waste equals Food“:** Wie in Kapitel 2.3.1 argumentiert ist „Waste equals Food“, welcher auf dem C2C-Konzept beruht, ein zentraler Gedanke der Kreislaufwirtschaft, der gleichwohl innerhalb der Grundprinzipien zirkulärer Wertschöpfung aufzugreifen ist (Ellen MacArthur Foundation, 2013; McDonough and Braungart, 2002).

2.3.3 Einordnung der Kreislaufwirtschaft in die Nachhaltigkeitsdebatte

Um den Klimawandel und seine Folgen in einem wirtschaftlich, sozial und ökologisch akzeptablen Rahmen zu halten, ist die Transformation zu einer klimaneutralen, nachhaltigen und ressourceneffizienten Wirtschaft und Gesellschaft unumgänglich. Da sich die Europäische Union als Vertragspartei des Pariser Klimaschutzabkommens dazu verpflichtet hat, bis 2050 dieser Klimaneutralität Folge zu leisten, wurde Ende 2019 von der EU-Kommission der europäische Green Deal präsentiert. Die darin enthaltenen Maßnahmen für einen nachhaltigen ökonomischen und ökologischen Wandel in Europa sollen dazu beitragen, dem ambitionierten Klimaschutzziel der Klimaneutralität bis 2050 Folge zu leisten. Mit der Umgestaltung der Produktions- und

Verbrauchssysteme soll eine Entkopplung des Wirtschaftswachstums von dem materiellen Ressourcenverbrauch ermöglicht werden. Damit ist der Green Deal als wesentlicher Bestandteil zur Umsetzung der Agenda 2030 für nachhaltige Entwicklung der UN anzusehen. Neben der Dekarbonisierung des Energiesektors und der Reduktion des Energieverbrauchs von Gebäuden, stellt die „Mobilisierung der Industrie für eine saubere und kreislauforientierte Wirtschaft“ einen der wichtigsten Bausteine des europäischen Green Deals dar (BMK, 2021; Europäische Kommission, 2019).

Bereits vier Jahre zuvor, im Jahr 2014, wurde der Übergang zur Kreislaufwirtschaft von Seiten der EU durch den ersten Kreislaufwirtschaftsaktionsplan „Den Kreislauf schließen“ geebnet. Anfang 2020 folgte schließlich der neue Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft „Für ein sauberes und wettbewerbsfähiges Europa“. Er umfasst eine nachhaltige Produktionspolitik, die Bioökonomie, die Vermeidung von Abfällen, die Nutzung von Sekundärrohstoffen und Recycling sowie die Optimierung von zentralen Produktwertschöpfungsketten. Die nachhaltige Produktionspolitik bildet hierbei einen Schlüsselbereich des Aktionsplans und sieht neben dem Design von Produkten, auch zirkuläre, ressourceneffiziente Produktionsprozesse, sowie eine Stärkung der Konsument:innen und der öffentlichen Auftraggeber:innen vor. Damit soll das Ziel erreicht werden, nachhaltige Produkte, Dienstleistungen und Geschäftsmodelle zum neuen Standard der Europäischen Union zu machen (BMK, 2021).

Zur nationalen Umsetzung der globalen Anforderungen innerhalb Österreichs werden die Ziele für nachhaltige Entwicklung (SDGs) der Agenda 2030 und Leitlinien des europäischen Green Deals als Rahmenwerke herangezogen. Die Vision der österreichischen Regierung ist eine nachhaltige Gesellschaft und Wirtschaft zu verwirklichen, *„die eine materielle und energetische Ressourcennutzung innerhalb der ökologischen Tragfähigkeit der Erde ermöglicht, sodass die Natur- und Lebensgrundlagen für heutige und zukünftige Generationen sichergestellt werden, sowie einen hohen Wohlstand, Gesundheits- und Lebensstandard für die Menschen“* geschaffen werden kann. Basis der Kreislaufwirtschaftsstrategie Österreichs sind die Grundsätze der Kreislaufwirtschaft, die das Ziel verfolgen, zu einer Reduktion des Ressourcenverbrauchs, einer Vermeidung von Abfällen und Umweltverschmutzung und einer Steigerung der Wertschöpfung und Ressourceneffizienz beizutragen (BMK, 2021).

2.3.4 Umsetzung der Kreislaufwirtschaftsstrategie auf nationaler Ebene

Um das Ziel der Klimaneutralität bis 2050 auf nationaler Ebene zu erreichen, bedarf es einer Verstärkung der Kreislaufwirtschaft und einer Senkung des primären Rohstoffverbrauchs. Zufolge des österreichischen Bundesministeriums für Klimaschutz (BMK) ist Kreislaufwirtschaft ein zentraler Ansatz zu nachhaltiger Neugestaltung linearer Gesellschafts- und Wirtschaftssysteme, um zukünftig die Bedürfnisse der Gesellschaft durch eine optimierte und effiziente Nutzung von Ressourcen zu decken. Damit sollen nicht nur ökologische bzw. ökonomische Herausforderungen, wie die Klimakrise, Umweltverschmutzung, Biodiversitätsverluste, sowie die zunehmende Ressourcenknappheit überwunden werden, sondern gleichwohl soziale Bedürfnisse befriedigt werden. Innerhalb des kreislauforientierten Wirtschaftssystems werden Ressourcen umweltverträglich gewonnen und daraus hergestellte Güter möglichst ressourcenschonend produziert. Um das Abfallaufkommen, den Ressourcenverbrauch und damit die Umweltbelastung zu minimieren, wird die Lebensdauer der Produkte verlängert und deren Nutzung intensiviert. Dabei unterstützen soll eine langlebige, schadstofffreie, reparierbare und aufrüstbare Produktgestaltung und ein dienstleistungsorientiertes Geschäftsmodell. Ist keine anderweitige Verwertung der Produkte möglich, werden sie dem Abfallstrom zugeführt und als Sekundärrohstoffe wieder in den Stoffkreislauf eingebracht. Nur bei jenen Abfällen, die keiner stofflichen Verwertung unterzogen werden können, ist eine energetische Nutzung oder Deponierung in Betracht zu ziehen. Einen schematischen Überblick über das Konzept der Kreislaufwirtschaft ist in der nachfolgenden Abbildung zu finden (BMK, 2021, 2020).

Schematische Darstellung der Kreislaufwirtschaft

angelehnt an BMK (2021)

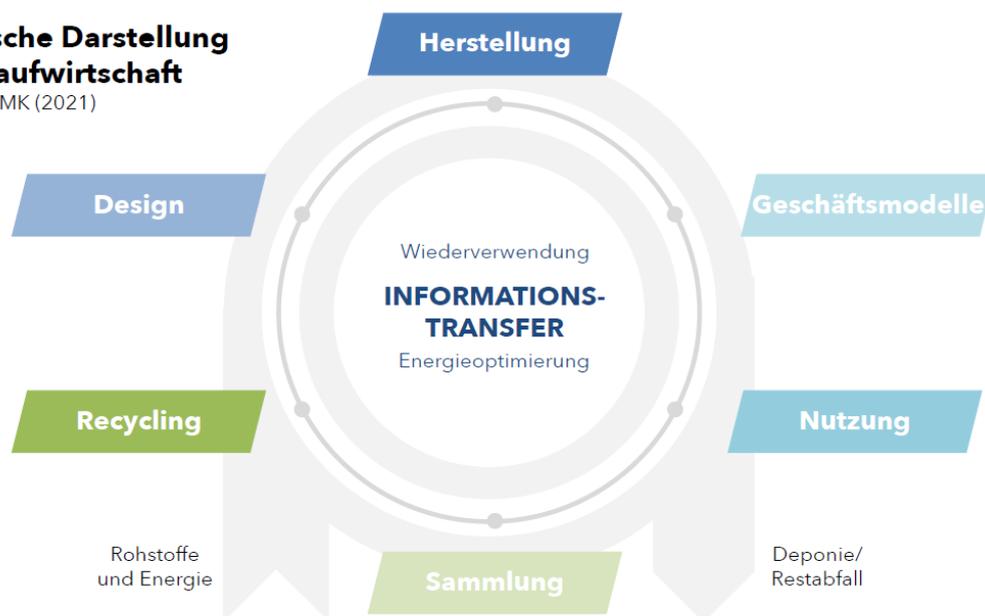


Abbildung 6: Schematische Darstellung der Kreislaufwirtschaft (vgl. BMK, 2021)

Der Fokus der österreichischen Kreislaufwirtschaftsstrategie liegt dabei auf folgenden drei Handlungsfeldern: Nachhaltige Produktion und Design, Nachhaltiger Konsum und Nutzung, Recycling und Sekundärrohstoffe. Ein ausgeklügeltes Produktdesign und eine intelligente Produktion sollen die Möglichkeit bieten, langlebige und hochwertige Produkte und Dienstleistungen mit geringem Ressourceneinsatz und Schadstofffreiheit herzustellen, bei gleichzeitiger hoher Wertschöpfung. Durch eine Intensivierung der Nutzungsdauer von Produkten sollen diese möglichst lange im Wirtschaftskreislauf gehalten werden. Dieses Ziel soll durch die Gestaltung attraktiver Geschäfts- und Nutzungsmodelle, sowie breiter Informationsbereitstellung für Konsument:innen und Auftraggeber:innen ermöglicht werden. Um Material- und Stoffflüsse zu schließen, soll der Materialbedarf der Produktion zudem durch qualitativ hochwertige Sekundärstoffe gedeckt werden. Um den Transformationsprozess von der linearen zur zirkulären Wertschöpfung zu unterstützen, werden folgende zehn Kreislaufwirtschaftsprinzipien von der österreichischen Regierung vorgestellt, die sich am R-Rahmenwerk orientieren (BMK, 2021).

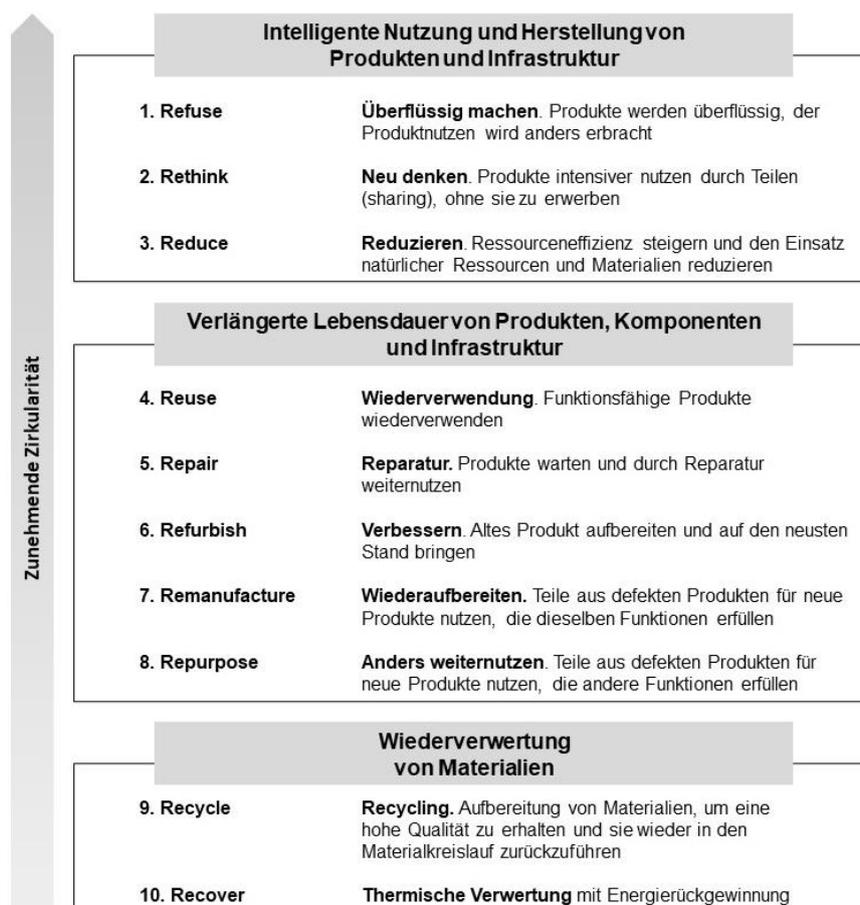


Abbildung 7: Grundsätze der Kreislaufwirtschaft in Österreich (vgl. BMK, 2021)

2.4 Aktueller Bedarf und Forschungslücke

Abschließend erfolgt auf Basis vorhergehender Kapitel, sowie Meta-Literaturanalysen unterschiedlicher Forscher:innen, eine Zusammenfassung der Erkenntnisse und eine Beschreibung aktueller Herausforderungen bei der Einführung zirkulärer Wertschöpfung in Produktionsunternehmen.

- Vorangetrieben durch die Industrialisierung ist global ein progressiver Anstieg an Material- und Energiebedarf zu vernehmen, der weitreichende Folgen für das gesamte Ökosystem der Erde mit sich bringt (WWF Deutschland, 2016).
- Die Verbesserung der Ressourcenproduktivität von Unternehmen ist nicht nur aus ökologischer Sicht notwendig, sondern kann angesichts der zunehmenden Volatilität der Rohstoffpreise auch ökonomische Vorteile für Unternehmen bieten (Wilts and Fink, 2016)
- Das Konzept der Kreislaufwirtschaft kann als eine Operationalisierung für Unternehmen zur Umsetzung des Konzepts der nachhaltigen Entwicklung angesehen werden, und visiert damit eine absolute Reduktion der physischen Stoffströme an (Ghisellini et al., 2016; Murray et al., 2017; OECD, 2016; UNEP, 2011).
- Es ist in den letzten Jahren weltweit eine Zunahme des Interesses am Konzept der Kreislaufwirtschaft zu vernehmen (Kurt et al., 2021)
- Trotz des wachsenden politischen Drucks, wie beispielsweise durch die Agenda 2030, in der 2015 der erste Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft verabschiedet wurde, stellt die Einführung zirkulärer Wertschöpfung eine große Herausforderung für die Industrie dar, dem ein kurzer Handlungszeitraum gegenübersteht (Wittpahl, 2020).
- Ein erster wichtiger Schritt zur nachhaltigen Industrietransformation ist die Verbesserung industrieller Produktionsprozesse, wobei der Konsens über mögliche Umsetzungsstrategien bzw. Methoden derzeit noch abgänglich ist (Lim et al., 2022; Wittpahl, 2020).

Auf Basis dessen soll sich die Arbeit mit der kritischen Betrachtung von Methoden und Ansätzen zur Einführung zirkulärer Wertschöpfung auf Mikroebene mit Fokus auf produzierende Unternehmen im Maschinenbausektor auseinandersetzen. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wird weiterführend die Einführung zirkuläre Wertschöpfung auf Produktionsebene, mit dem englischen Begriff „Circular Manufacturing (CM)“ abgekürzt.

3 Verwendete Methoden

Das nachfolgende Kapitel beschäftigt sich mit Bewertungs- und Analyseansätzen zur Identifizierung methodischer Betrachtungsschwerpunkte bestehender Literatur zum Thema zirkulärer Wertschöpfung. Hierzu wird das Konzept der systematischen Literaturrecherche in Verbindung mit einer bibliometrischen Analyse herangezogen, welches es ermöglicht, relevante Literatur zu identifizieren und die daraus gewonnenen Betrachtungsschwerpunkte zu untersuchen. Ziel ist es, durch diese Untersuchungen, Methoden und Ansätze zur Einführung zirkulärer Wertschöpfung auszumachen. Die Bewertung der ermittelten CM Methoden und Ansätze soll mit Hilfe der MCDM-Methode erfolgen.

3.1 Systematische Literaturrecherche

Mit wachsender Anzahl an wissenschaftlichen Publikationen und dem zeitgleich erleichterten Zugang zu diesen, durch elektronische Datenbanken und dergleichen, gewinnt die systematische Literaturrecherche (SLR) zunehmend an Bedeutung, um Ordnung in der wachsenden Informationsflut zu schaffen. Im Gegensatz zu klassischen Literaturreviews wird bei der systematischen Literaturrecherche versucht, die Auswahl- und Analyseprozesse der Literatur so nachvollziehbar wie möglich zu gestalten. Damit gelingt es, aktuelle Forschungsfelder systematisch aufzubereiten und darauf basierend Forschungstrends aufzuweisen (Jungnickel, 2017).

3.1.1 Notwendigkeit einer systematischen Literaturrecherche

Zufolge A. Fink kann die SLR wie folgt definiert werden:

“A research literature review is a systematic, explicit, and reproducible method for identifying, evaluation, and synthesizing the existing body of completed and recorded work produced by researchers, scholars, and practitioners.” (Fink, 2010)

Die Planung und Durchführung einer systematischen Literaturrecherche können auf verschiedene Arten erfolgen. Die unterschiedlichen Herangehensweisen bei der Durchführung der SLR vereint jedoch eine nachvollziehbare und systematische Vorgehensweise, welche ihre Reproduzierbarkeit gewährleisten soll. Die SLR ist eine wissenschaftlich eigenständige Methode und stellt eine strenge, transparente Form der Literaturüberprüfung dar. Damit umfasst sie die Identifizierung, Bewertung und Synthese aller verfügbaren qualitativen und oder quantitativen Beweise, zur Generierung einer robusten, empirisch abgeleiteten Antwort auf eine Forschungsfrage. Um vielfältige, zuverlässige und reproduzierbare Ergebnisse zu

generieren, ist eine systematische Vorgehensweise essenziell (Jungnickel, 2017; Mallett et al., 2012; Wibbeke, 2019).

Unter der Voraussetzung, dass eine konsequente Planung und Durchführung der systematischen Literaturrecherche herangezogen werden, ist gemäß Paul et al. (2021) sogar davon auszugehen, dass diese die informativste und wissenschaftlichste Methode der Recherche darstellt. Dabei gehört die SLR laut Elsbach und van Knippberg (2020) „zu den nützlichsten Instrumenten, um das Wissen zu erweitern und die Forschung voranzutreiben“. Die dabei behandelten Forschungsfragen können zufolge Snyder (2019) mit einer solchen Aussagekraft adressiert werden, die eine einzelne Studie nicht zu erreichen vermag, weil SLR „Erkenntnisse und Perspektiven aus vielen empirischen Erkenntnissen integrieren“ (Elsbach and van Knippenberg, 2020; Paul et al., 2021; Snyder, 2019).

Die Notwendigkeit, auch in dieser Arbeit eine systematische Literaturrecherche zur Beantwortung der Forschungsfragen heranzuziehen, liegt jedoch nicht nur in ihrer wissenschaftlich anerkannten Natur begründet, sondern kann zudem wie folgt argumentiert werden. Wie die Analyse der Entwicklung des Forschungsgebietes zeigt, ist allen voran in den letzten 5 Jahren ein starker Anstieg an jährlich veröffentlichten Publikationen im Bereich Kreislaufwirtschaft, mit einer annähernd exponentiellen Zunahme, zu vermerken, vgl. Abbildung 3. Während der Analyse des aktuellen Standes der Technik im Bereich „Circular Manufacturing“ konnten eine Hand voll Papers identifiziert werden, die sich dieser Thematik widmen. Das Paper „A literature review on circular economy adoption in the manufacturing sector“ von Arcerbi und Taisch (2020) nimmt dabei eine Schlüsselrolle ein, da es als Basis für die Identifizierung von Methoden und Ansätzen zur Einführung der zirkulären Wertschöpfung für diese Arbeit herangezogen werden soll. Die Autoren Arcerbi und Taisch haben jedoch den Erhebungsprozess der durchgeführten SLR mit 31. Juli 2019 eingestellt. Die weiterführende Betrachtung der Arbeit ergibt jedoch, dass vor allem im Zeitraum zwischen 2020-2022 eine enorme Zunahme an Veröffentlichungen zu vernehmen ist. So zeigt eine Untersuchung der Sucheingabe („circular economy“ AND "manufacturing") OR "circular manufacturing"), dass über 50 Prozent der Publikationen innerhalb von Scopus erst nach Juli 2019 entstanden. Aufgrund dessen wird in der vorliegenden Arbeit ebenfalls eine SLR zum Themenbereich "Circular Manufacturing“ durchgeführt, die den Fokus jedoch auf Publikationen nach Juli 2019 legt. Mit Hilfe der systematischen Literaturrecherche soll somit die entstandene Forschungslücke geschlossen werden, vgl. Paul et al. (2021).

3.1.2 Theoretischer Hintergrund systematische Literaturrecherche

Die theoretische Grundlage der, in dieser Arbeit, durchgeführten systematischen Literaturrecherche bietet das Paper „Towards a Methodology for Developing Evidence-Informed Management Knowledge by Means of Systematic Review“ von Tranfield et al. (2003), sowie das Paper “Scientific procedures and rationales for systematic literature reviews (SPAR-4-SLR)” von Paul et al. (2021).

Die systematische Literaturrecherche kann sowohl eine Methodologie, für als auch ein Produkt der wissenschaftlichen Forschung darstellen. Die SLR als Methodologie umfasst den Prozess des Zusammenstellens (Assembling), Ordnen (Arranging) und Beurteilens (Assessing) bestehender Literatur eines Recherchebereichs. In diesem Zusammenhang wird auch von den „drei As“ gesprochen. Das „Assembling“ bezieht sich dabei auf die Identifizierung und Beschaffung, das „Arranging“ auf die Organisation und Bereinigung und das „Assessing“ auf die Bewertung sowie Dokumentation der Literatur. Mit der systematischen Literaturrecherche, als Produkt der Forschung, wird somit das Ziel verfolgt, den aktuellen Stand der Technik (State-of-the-Art) möglichst realitätsgetreu abzubilden und auf Basis dessen weitere Forschungspotentiale abzuleiten (Paul et al., 2021; Tranfield et al., 2003).

Gemäß Palmatier et al. (2018) kann die systematische Literaturrecherche unterschiedliche Formen annehmen, darunter bereichs-, theorie- und methodenbasierte Reviews. Während methodenbasierte Ansätze den Fokus auf die Entwicklung einer bestimmten Methode in einem Review-Bereich legen, untersuchen theoriebasierte Ansätze die Entwicklung einer bestimmten Theorie. In der nachfolgenden Arbeit wird auf einen bereichsbezogenen Ansatz zurückgegriffen. Dieser beschäftigt sich mit der Entwicklung eines Bereichs, einer Branche oder eines Themas und äußert sich auf fünf Arten: Strukturierte themenbasierte, rahmenbasierte, bibliometrische, hybride und konzeptionelle Reviews. Für eine detaillierte Beschreibung der Unterscheidungsmerkmale der einzelnen Arten ist auf das zuvor angeführte Paper von Paul et al. (2021) zu verweisen. Da die Autoren ausdrücklich auf die Vorteile rahmenbasierter Reviews gegenüber den anderen vier Arten verweisen, wird für die Ermittlung der CM Methoden und Ansätze auf diese Form zurückgegriffen. Den theoretischen Rahmen für diese Arbeit bietet das Paper „A literature review on circular economy adoption in the manufacturing sector“ von Acerbi und Taisch (2020). Für die Abbildung aktueller Trends im Bereich zirkuläre Wertschöpfung soll sich die nachfolgende Arbeit dagegen auf einen bibliometrischen Ansatz stützen. Demzufolge kann der hier verwendete Ansatz der hybriden Form, welcher die beiden Unterformen (rahmenbasiert und bibliometrische) kombiniert, zugeordnet werden (Acerbi and Taisch, 2020; Palmatier et al., 2018; Paul et al., 2021).

Gemäß Tranfield et al. (2003) kann der grundsätzliche Aufbau einer systematischen Literaturrecherche wie folgt unterteilt werden, an dem sich diese Arbeit orientiert.

| Stufe I – Planung des Reviews | |
|--|--|
| Phase 0 | Feststellung des Bedarfs an einem Review |
| Phase 1 | Ausarbeitung eines Vorschlags für ein Review |
| Phase 2 | Entwicklung eines Review-Protokolls |
| Stufe II – Durchführung des Reviews | |
| Phase 3 | Identifizierung der Forschungsarbeiten |
| Phase 4 | Auswahl von Studien |
| Phase 5 | Bewertung der Studienqualität |
| Phase 6 | Datenextraktion und Überwachung des Fortschritts |
| Phase 7 | Synthese der Daten |
| Stufe III – Berichterstattung und Dissemination | |
| Phase 8 | Bericht und Empfehlungen |
| Phase 9 | Erkenntnisse in die Praxis umsetzen |

Tabelle 1: Phasen der systematischen Literaturrecherche (Tranfield et al., 2003)

Stufe I – Planung des Reviews

Ziel der ersten Phase, der Planungsphase, ist es, den Inhalt des zu behandelnden Themas zu konkretisieren und einzugrenzen. Ein Überblick über bestehende theoretische bzw. praktische Forschungstätigkeiten ermöglicht es, eine Recherchefrage abzuleiten. Die Entwicklung eines Review-Protokolls stellt zudem einen essentiellen Teil dieser Stufe dar (Tranfield et al., 2003).

Da sich in den vergangenen Jahren das PRISMA-Protokoll von Moher et al. (2009) für die Protokollierung der Ergebnisse etabliert hat, wird in dieser Arbeit kein eigenes Protokoll entwickelt, sondern auf eine weiterentwickelte Version dieses Protokolls zurückgegriffen. Dazu wird die "Scientific Procedures and Rationales for Systematic Literature Reviews" oder kurz das SPAR-4-SLR-Protokoll von Paul et al. (2021) herangezogen, welches speziell für systematische Literaturrecherchen dieser Art konzipiert wurde.

Das SPAR-4SLR-Protokoll kann in drei Phasen (Zusammenstellen, Ordnen, Beurteilen) unterteilt werden, die jeweils aus zwei Unterphasen bestehen, vgl. Abbildung 8. Damit wird die einleitend diskutierte Unterscheidung der SLR als Methodologie, im Sinne der „drei As“, adressiert. Gleichwohl wird mit Hilfe des Protokolls die Vorstellung der systematischen Literaturrecherche als Produkt der Forschung aufgegriffen, womit zur Erreichung des Ziels, den aktuellen Stand der Technik (State-of-the-Art) möglichst realitätsgetreu abzubilden, beigetragen werden soll (Paul et al., 2021).

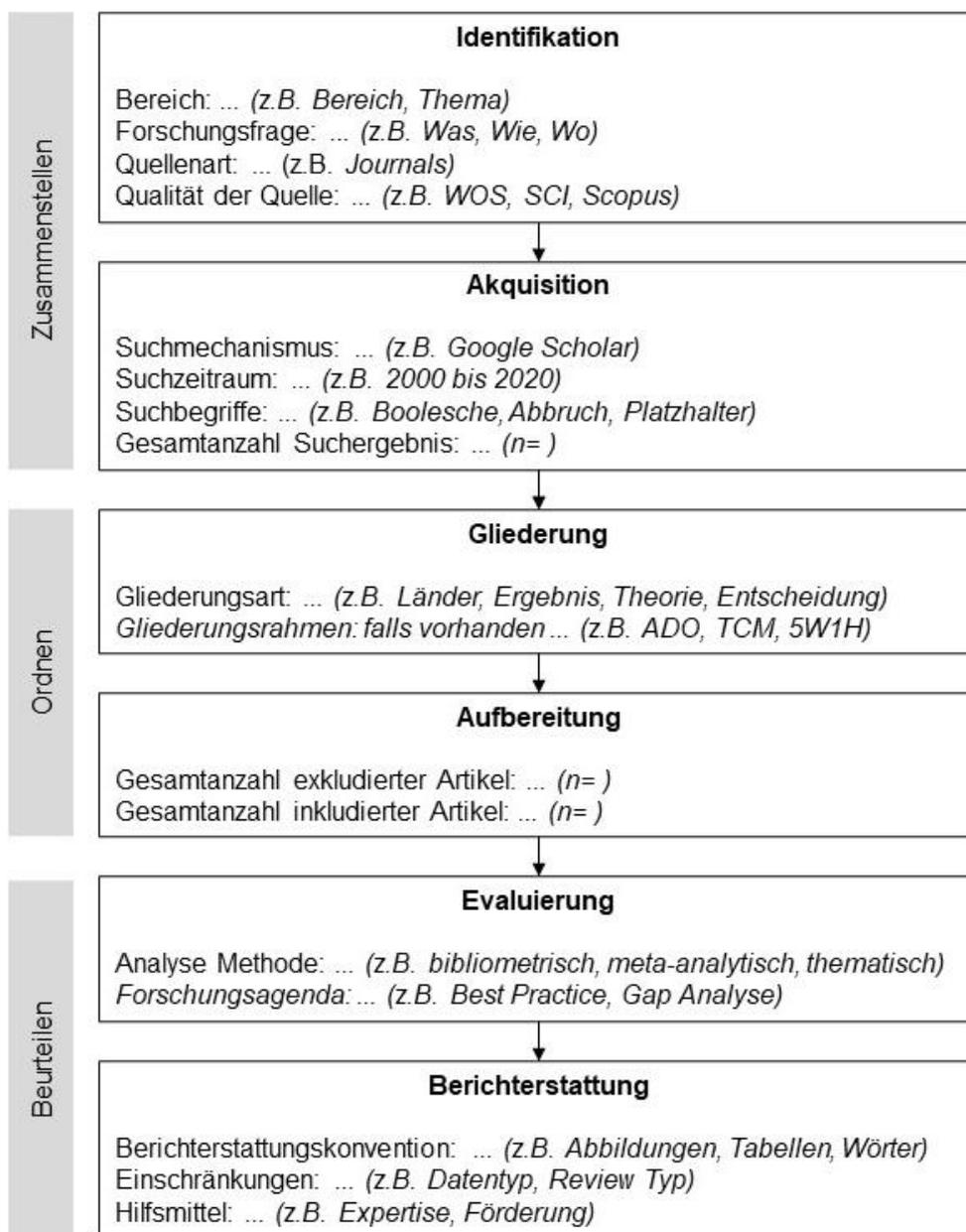


Abbildung 8: SPAR-4-SLR Protokoll nach Paul et al. (2021)

Stufe II – Durchführung des Reviews

Der zweite Abschnitt legt den Fokus auf die Durchführung der Recherche. Ein systematisches Vorgehen steht an oberster Stelle, welches die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse gewährleistet. Wesentliche Schritte dabei sind die Identifikation geeigneter Schlüsselwörter, die Verknüpfung dieser durch Boolesche Operatoren, die Auswahl einer geeigneten Datenbank und die Ermittlung geeigneter Ein- und Ausschlusskriterien, um einer selektiven Auswahl entgegenzuwirken und damit die Vollständigkeit der erhaltenen Suchergebnisse zu gewährleisten. Mit dem Ziel relevante Literatur zu identifizieren, erfolgt anschließend die inhaltliche Analyse der Ergebnisse. Dazu wird die Literatur einem sogenannten Screening unterzogen. Gemäß Grenz-Farenholtz (2013) kann dieser Prozess in drei Schritte unterteilt

werden, das Titel-, Abstract- und Volltext-Screening, vgl. Abbildung 9. In den ersten beiden Schritten findet eine grobe Vorselektion der Literatur anhand des Titels und Abstracts statt. Danach erfolgt eine detailliertere Betrachtung der Inhalte mittels Volltext-Analyse. Die Anzahl der inkludierten und exkludierten Quellen in jedem Schritt bedarf einer akkuraten Dokumentation, sowie Begründung. Diese kann dem Protokoll entnommen werden (Grenz-Farenholtz, 2013; Tranfield et al., 2003).

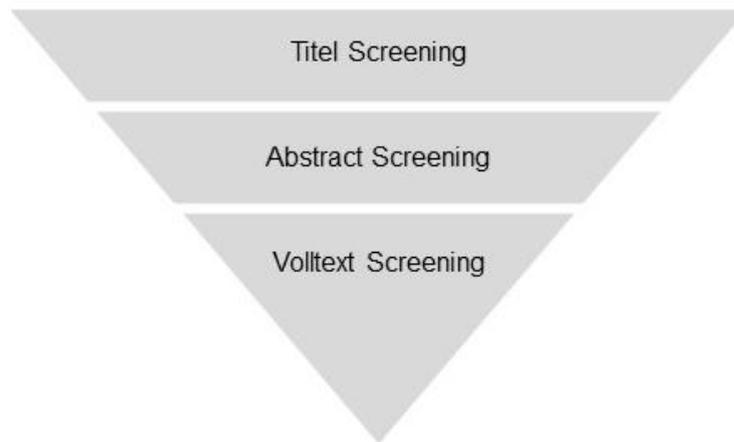


Abbildung 9: Identifizierung relevanter Publikationen gemäß Grenz-Farenholtz (2013)

Stufe III – Berichterstattung und Dissemination

Die durchgeführte systematische Literaturrecherche verfolgt das Ziel, den aktuellen Stand der Technik im Bereich zirkulärer Wertschöpfung möglichst realitätsgetreu abzubilden. In der letzten Stufe der Literaturrecherche werden deshalb alle erhaltenen Ergebnisse zusammengefasst. Diese Zusammenfassung ist in zwei Schritte unterteilt. Zunächst erfolgt eine deskriptive Analyse, in der auf Kategorien wie Autor, Herkunftsland, Erscheinungsjahr, Quelle etc. eingegangen wird. Anschließend erfolgt die thematische Analyse, in der etwa auf den herrschenden Konsens verschiedener Themen, aufkommende Forschungsfragen bzw. Themengebiete eingegangen wird. Wesentliche Bestandteile dieser Analyse sind zudem die Klassifizierung bzw. Kategorisierung der ermittelten CM Methoden und Ansätze (Tranfield et al., 2003).

3.2 Bibliometrische Analyse

Die bibliometrische Analyse der Ergebnisse soll Aufschlüsse über die Wahrnehmung und wissenschaftliche Publikationsleistung des Forschungsgebietes geben. Dazu wird das bibliometrische Analysetool „Bibliometrix“ nach Aria & Cuccurullo (2017) herangezogen, welches durch die Verwendung der Programmiersprache R eine Integration mit anderen statistischen und grafischen Analysepaketen ermöglicht.

In der Wissenschaft werden unterschiedliche qualitative und quantitative Ansätze zur Überprüfung der Literatur herangezogen, um die erhaltenen Ergebnisse zu

strukturieren und zu verstehen. Die Bibliometrie bietet die Möglichkeit, den Überprüfungsprozess systematisch, transparent und reproduzierbar zu gestalten. Mit Hilfe von statistischen Messungen können große Mengen an Informationen objektiv und strukturiert analysiert werden (Aria and Cuccurullo, 2017).

Trotz einer Ausweitung des Anwendungsfeldes der Bibliometrie, ist die bibliometrische Analyse ein komplexer Vorgang der unterschiedliche Analyse- und Mapping-Software-Tools erfordert und zumeist gute Programmierkenntnisse bedingt. Deshalb wird von Aria und Cuccurullo (2017) das Analysetool „Bibliometrix“ vorgestellt, welches durch die Verwendung der Programmiersprache R eine Integration mit anderen statistischen und grafischen Analysepaketen ermöglicht. Abbildung 10 veranschaulicht den Workflow des Bibliometrix R-Paket (<http://www.bibliometrix.org>).

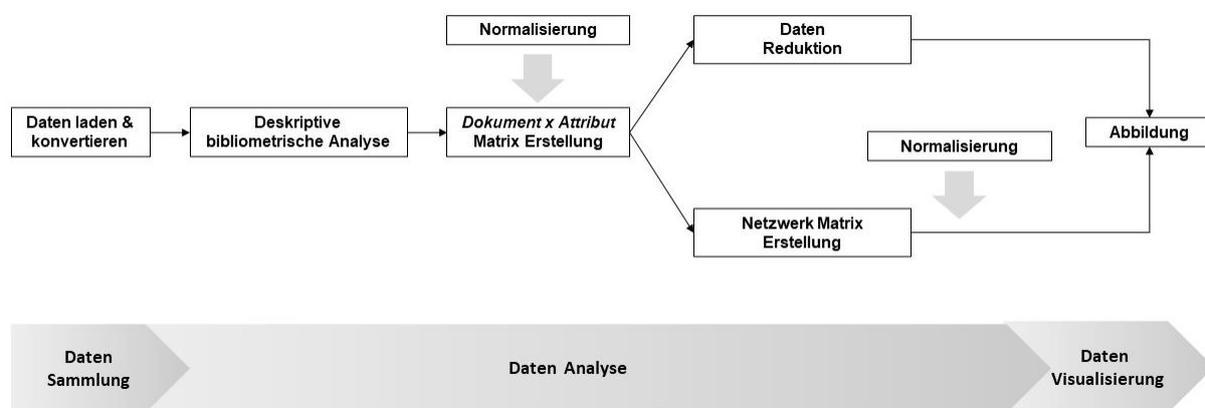


Abbildung 10: Workflow des Bibliometrix R-Paket (vgl. Aria and Cuccurullo, 2017)

Bibliometrix unterstützt gemäß Aria und Cuccurullo (2017) folgende Phasen:

1. Datenerfassung
 - a. Laden der Daten und Konvertierung in einen R-Datenrahmen
2. Datenanalyse gegliedert in drei Schritte
 - a. Deskriptive Analyse eines bibliometrischen Datenrahmens
 - b. Erstellung von Netzwerken für bibliografische Kopplungs-, Kozitations-, Kollaborations- und Co-Occurance-Analysen
 - c. Normalisierung
3. Visualisierung der Daten
 - a. Abbildung der konzeptuellen Struktur
 - b. Netzwerkkabbildung

In dieser Arbeit soll die deskriptive bibliometrische Analyse der Ergebnisse mit Hilfe des Bibliometrix Analysetool nach Aria und Cuccurullo (2017) durchgeführt werden. Die Analyse gibt Aufschlüsse über die Wahrnehmung und wissenschaftliche Publikationsleistung des Forschungsgebietes.

3.3 Multi-Criteria Decision Making Methode

3.3.1 Notwendigkeit einer multikriteriellen Bewertungsmethode

Während klassische Modelle zur Entscheidungsfindung häufig ausschließlich eine Zielgröße berücksichtigen, können mit der Methode der multikriteriellen Entscheidungsunterstützung, engl. Multi-Criteria Decision Making (MCDM), eine Vielzahl an Kriterien aus den unterschiedlichsten Bereichen einbezogen werden. Damit wird die Möglichkeit geboten, den Prozess der Entscheidungsfindung zu strukturieren, um die komplexe, mehrdimensionale Problemstellung mit all seinen Bestandteilen besser zu verstehen und angemessen bewerten zu können. Nicht zuletzt deshalb erfährt diese Methode zunehmend Aufmerksamkeit in der Bewertung von Nachhaltigkeitsaspekten (Ahmed et al., 2022; dos Santos Gonçalves and Campos, 2022; Stankevičienė and Nikanorova, 2020).

Angesichts der inhärenten Komplexität von zirkulären Systemen hat die Verwendung von MCDM auch zur Bewertung von Kreislaufwirtschaftsaspekten zugenommen. Mehrere Studien, darunter Shen et al. (2013), Sassanelli et al. (2019), Garcia-Bernabeu et al. (2020) und Alamerew und Brissaud (2019), priorisieren diese Methode zur Bewertung von Kreislaufwirtschaftsstrategien und -leistungen (Alamerew and Brissaud, 2019; Garcia-Bernabeu et al., 2020; Sassanelli et al., 2019; Shen et al., 2013)

Diesen Tatsachen zugrunde liegend soll die Methode der multikriteriellen Entscheidungsunterstützung auch für diese Arbeit herangezogen werden, um die Kreislauffähigkeit der in Kapitel 4 ermittelten CM Methoden und Ansätze zu bewerten und damit Forschungsfrage F4 zu adressieren. Wie die SLR von dos Santos Gonçalves and Campos (2022) zum Thema „Multikriterielle Methoden zur Messung der CE“ zeigt, sind aktuelle TOPSIS und AHP die am weitest verbreiteten MCDM-Techniken im Bereich Kreislaufwirtschaft auf Mikroebene. TOPSIS zeichnet sich durch eine einfache Implementierung und der Möglichkeit aus, eine unbegrenzte Anzahl von Alternativen und Kriterien zu berücksichtigen. Mit dem AHP wird die Analyse komplexer Problemstellungen mit unterschiedlichen, untereinander verknüpften Zielsetzungen möglich (dos Santos Gonçalves and Campos, 2022).

Da es sich bei der Bewertung der Kreislauffähigkeit von CM Methoden und Ansätzen um ein komplexes Problem, mit einer Vielzahl unterschiedlicher, sich gegenseitig beeinflussenden Zielsetzungen und einer großen Menge an möglichen Handlungsmaßnahmen, handelt, soll in dieser Arbeit eine Kombination dieser beiden Verfahren herangezogen werden. Den theoretischen Hintergrund bei der Implementierung dieser Methoden bieten die Arbeiten von Geldermann und Lercher (2014), Stankevičienė and Nikanorova (2020) und Ahmed et al. (2022).

3.3.2 Theoretischer Hintergrund Multi-Criteria Decision Making

Methode

Zur Aufbereitung komplexer Entscheidungsprobleme liegen unterschiedliche MCDM-Ansätze vor, die gemäß Geldermann und Lerche (2014) im Wesentlichen wie folgt aufgebaut sind:

| Strukturelement | Beispiel: Autokauf |
|---------------------|---|
| Alternativen | Wagen A, Wagen B, ... |
| Zielsystem | Kosten |
| Kriterien | Anschaffungspreis, Spritverbrauch, ... |
| Präferenz | z.B. je weniger Spritverbrauch desto besser |
| Kriteriengewichtung | z.B. Anschaffungspreis wichtiger als Spritverbrauch |

Tabelle 2: Grundstruktur komplexer Entscheidungsprobleme (Geldermann and Lerche, 2014)

Alternativen

Für die Lösung des Entscheidungsproblems gibt es unterschiedliche Wahlmöglichkeiten, diese werden als die Alternativen bezeichnet. Sie stellen potenzielle Handlungsoptionen bzw. Maßnahmen dar, welche sich aus dem Entscheidungsproblem ergeben. Dabei werden immer mindestens zwei Alternativen miteinander verglichen. Am Beispiel des Autokaufs könnte es sich bei den zur Auswahl stehenden Alternativen um unterschiedliche Automodelle handeln (Geldermann and Lerche, 2014).

Zielsystem

Ein essenzieller Teil der gelungenen Entscheidungsunterstützung ist die Definition der verfolgten Ziele. Ein Ziel beschreibt dabei einen zukünftigen, vom Status quo unterschiedlichen und erwünschten Zustand. Damit könnte das Ziel beispielsweise darin bestehen, ein kostengünstiges Auto auszuwählen. Hierbei ist es wichtig, dass die Ziele eindeutig, messbar und wirklichkeitsgetreu bleiben (Geldermann and Lerche, 2014).

Kriterien

Auf Basis der definierten Ziele erfolgt anschließend die Bestimmung relevanter Kriterien. Die Kriterien ermöglichen es zu prüfen, inwieweit und zu welchem Grad das jeweilige Ziel erreicht wird. Mit Hilfe der MCDM-Methode wird es folglich möglich, durch die Berücksichtigung mehrerer Kriterien innerhalb des Entscheidungsproblems unterschiedliche Zielsetzungen zeitgleich zu adressieren. Folglich ist es von großer Bedeutung bei der Festlegung der entscheidungsrelevanten Kriterien, logische Zusammenhänge zu den jeweiligen Zielen zu knüpfen. Bei der Darstellung struktureller

Zusammenhänge zwischen Zielsystem und Kriterien hat sich die Darstellung in Form einer Kriterienhierarchie als hilfreich erwiesen und ist deshalb wichtiger Bestandteil des Entscheidungsprozesses. Innerhalb dieser Hierarchie findet eine Unterteilung in oberstes Ziel, Zielsysteme, Kriterien und Maßeinheit statt, vgl. Abbildung 11. Zunächst wird ein grobes oberstes Ziel definiert, welches über die Zuordnung von verbundenen Unterzielen (Zielsystemen) aufgeschlüsselt wird. Für jedes Unterziel werden danach entscheidungsrelevante Kriterien formuliert, denen im Anschluss daran ein messbares Attribut zugewiesen wird (Geldermann and Lerche, 2014).

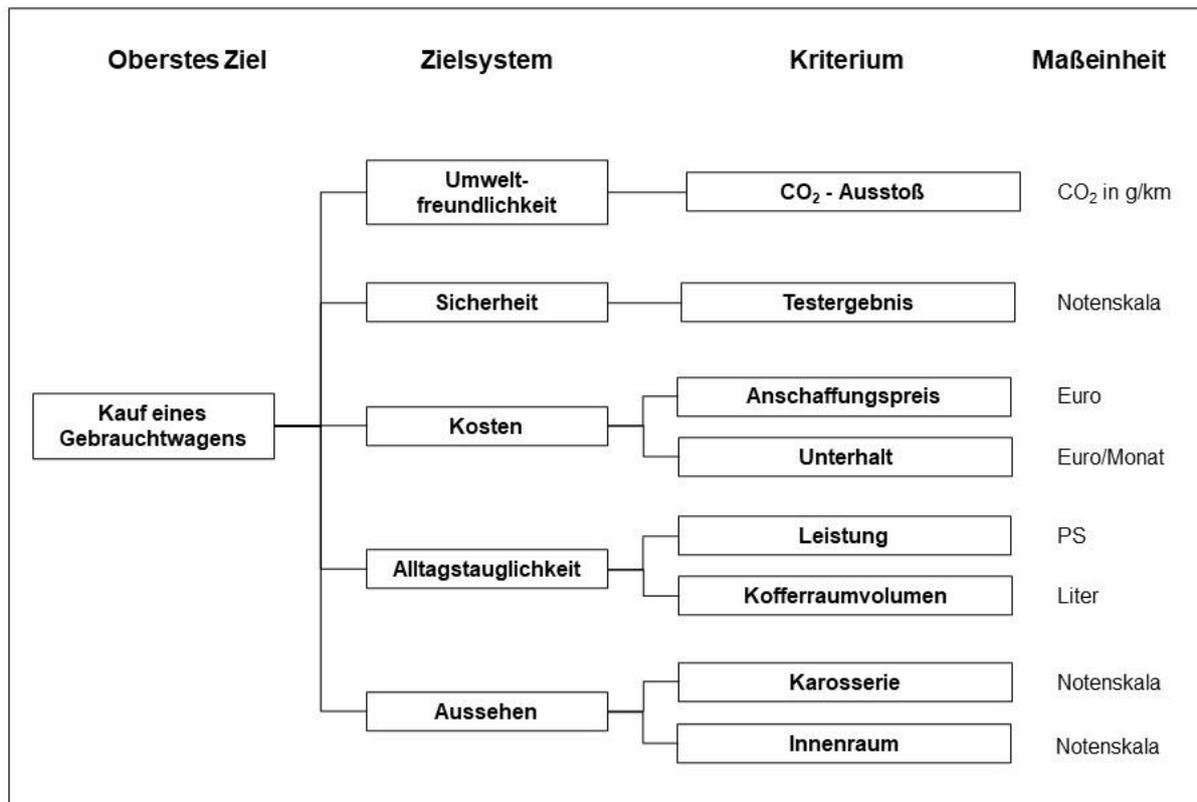


Abbildung 11: Beispielhafte Kriterienhierarchie (vgl. Geldermann and Lerche, 2014)

Präferenz

Um die positiven und negativen Einstellungen des Entscheidungsträgers gegenüber den Konsequenzen, die die Alternativen beinhalten, abbilden zu können, werden Präferenzen benötigt. Diese offen darzulegen und handzuhaben ist von hoher Bedeutung bei der Methode der multikriteriellen Entscheidungsunterstützung. Zur Darstellung der Präferenz werden unterschiedliche Begrifflichkeiten herangezogen. So weist beispielsweise strikte Präferenz auf, dass eine Alternative der anderen konkret vorgezogen wird. Wohingegen Indifferenz bedeutet, dass der Entscheidungsträger beide Alternativen als gleichwertig betrachtet. Von reiner Präferenz spricht man, wenn eine Alternative als mindestens gleichwertig betrachtet wird. Die Präferenz einer Alternative kann dabei entweder über Präferenzfunktionen offengelegt werden, wie es

zum Beispiel in der MCDM-Methode PROMETHEE praktiziert wird, oder mit Hilfe einer Nutzenfunktion bestimmt werden (Geldermann and Lerche, 2014).

Kriteriengewichtung

Der Gewichtungsfaktor bzw. die Gewichtung gibt die Bedeutsamkeit des Kriteriums für das Gesamtproblem wieder. Zur Ermittlung dieses Gewichtungsfaktors gibt es eine Reihe unterschiedlicher Ansätze. Dabei kann zwischen subjektiven, objektiven und hybriden Gewichtungsmethoden unterschieden werden. Zu den subjektiven Gewichtungsmethoden zählt zum Beispiel der sogenannte Analytic Hierarchy Process (AHP), der in der Fachliteratur weitläufig eingesetzt wird. Ein Beispiel für einen objektiven Gewichtungsansatz ist die Entropie-Methode (Geldermann and Lerche, 2014).

3.3.3 Multi-Criteria Decision Making Framework

Angelehnt an das zirkuläre Assessment Framework von Ahmed et al. (2022), sowie dem Werk von Stankevičienė and Nikanorova (2020) kann das Vorgehen bei der multikriteriellen Entscheidungsfindung in folgende Schritte unterteilt werden:

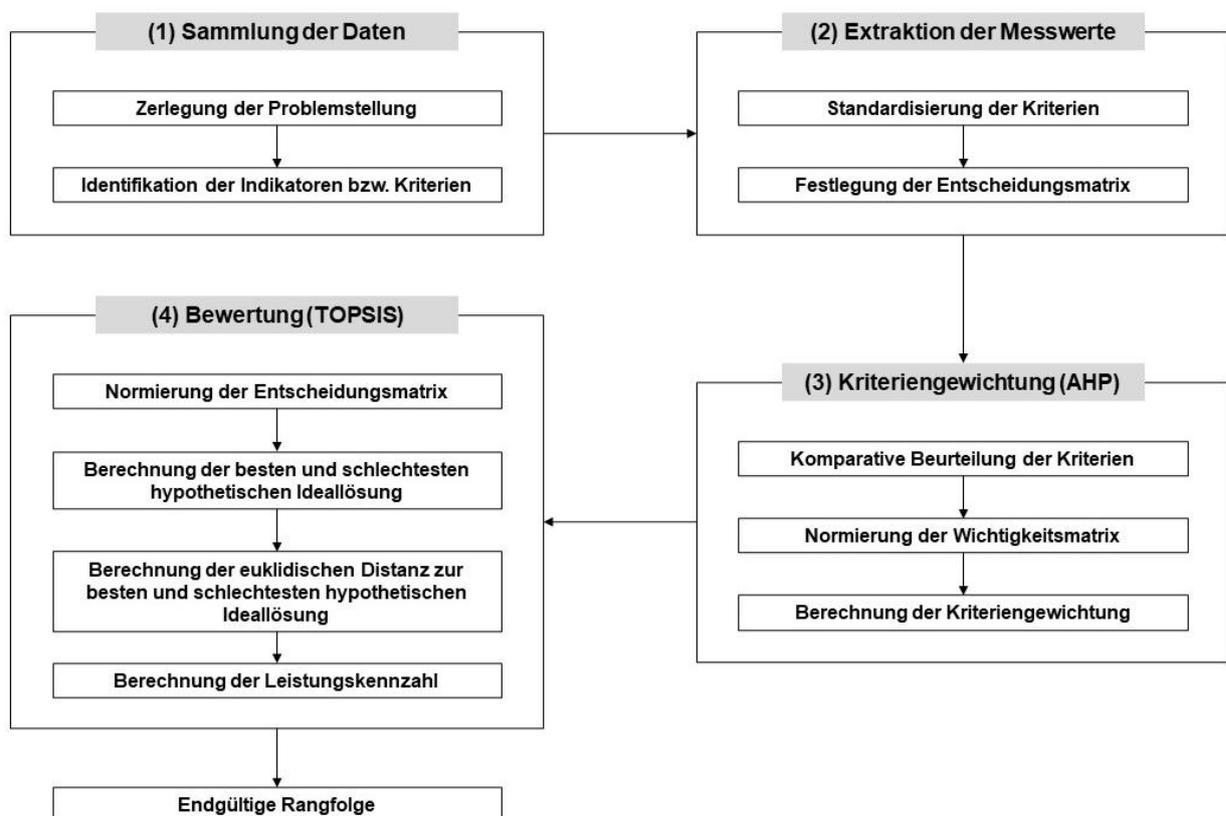


Abbildung 12: Vorgehen bei der multikriteriellen Entscheidungsfindung angelehnt an Ahmed et al. (2022)

(1) Sammlung der Daten

Ausgehend von der jeweiligen Problemstellung und Zielsetzung ergeben sich unterschiedliche potenzielle Handlungsoptionen (Alternativen). Zur Identifikation möglicher Kriterien empfiehlt sich die Aufschlüsselung der obersten Zielsetzung in unterschiedliche Zielsysteme. Auf Basis der festgelegten Zielsysteme erfolgt die Identifikation relevanter Kriterien bzw. Indikatoren (Ahmed et al., 2022; Geldermann and Lerche, 2014). Für die Darstellung struktureller Zusammenhänge zwischen Zielsystem und Kriterium kann die Kriterienhierarchie herangezogen werden, vgl. Kapitel 3.3.2.

(2) Extraktion der Messwerte

In diesem Schritt folgt eine Standardisierung der Kriterien, indem alle qualitativen Maßeinheiten (falls vorhanden) in eine quantifizierbare Form überführt werden. Die Ergebnisse dieses Prozesses können in Form einer Entscheidungsmatrix dargestellt werden, vgl. Abbildung 13 (Ahmed et al., 2022; Geldermann and Lerche, 2014).

| | Kriterium 1 | Kriterium 2 | ... | Kriterium w |
|---------------|-------------|-------------|-----|-------------|
| Alternative 1 | S_{11} | S_{12} | ... | S_{1w} |
| Alternative 2 | S_{21} | S_{22} | ... | S_{2w} |
| ... | ... | ... | ... | ... |
| Alternative r | S_{r1} | | ... | S_{re} |

Abbildung 13: Entscheidungsmatrix (vgl. Ahmed et al., 2022)

(3) Kriteriengewichtung

Die Kriteriengewichtung folgt der Analytic Hierarchy Process (AHP) Methode. Die Methode verwendet einen paarweisen Vergleich, um den Entscheidungsprozess in mehrere Hierarchieebenen zu unterteilen. Auf jeder Hierarchieebene findet eine Präferenzgewichtung statt. Allgemein kann die AHP-Methode in drei Phasen unterteilt werden. Zunächst erfolgt die Zerlegung des Problems, anschließend die komparative Beurteilung und abschließend die Präferenzgenerierung (Ahmed et al., 2022; dos Santos Gonçalves and Campos, 2022).

| | Kriterium 1 | Kriterium 2 | Kriterium w |
|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Kriterium 1 | 1 | 1/a | 1/b |
| Kriterium 2 | a | 1 | 1/c |
| Kriterium w | b | c | 1 |

Abbildung 14: Wichtigkeitsmatrix (vgl. Ahmed et al., 2022)

Die komparative Beurteilung der einzelnen Kriterien erfolgt innerhalb der Wichtigkeitsmatrix $P_{AHP} (w^*w)$, vgl. Abbildung 14. Dazu werden paarweise Vergleiche über die relative Bedeutung der einzelnen Kriterien durchgeführt. Es wird hierzu folgende Bewertungsskala verwendet:

| Intensität der Wichtigkeit | Definition |
|----------------------------|----------------------------|
| 1 | Gleiche Wichtigkeit |
| 3 | Mittlere Wichtigkeit |
| 5 | Starke Wichtigkeit |
| 7 | Sehr starke Wichtigkeit |
| 9 | Extrem wichtig |
| 2, 4, 6, 8 | Für die Zwischenwerte |
| Reziproken | Für den inversen Vergleich |

Tabelle 3: AHP Bewertungsskala (Ahmed et al., 2022)

Die Werte repräsentieren die relative Wichtigkeit einer Alternative im Vergleich zur anderen. Anschließend wird die Wichtigkeitsmatrix mit Hilfe der Gleichung 1 normiert, wobei p_{ij} ein Element der ursprünglichen Matrix $P_{AHP} (w^*w)$ ist und der Nenner die Summe aller Elemente in der jeweiligen Spalte (Ahmed et al., 2022).

$$r_{ij} = \frac{p_{ij}}{\sum_{i=1}^w e_{ij}}$$

Gleichung 1: Normierung der Wichtigkeitsmatrix (Ahmed et al., 2022)

Abschließend erfolgt die Berechnung der Kriteriengewichtung zufolge Gleichung 2, wobei N die Anzahl der Alternativen darstellt.

$$w = \frac{\sum_{i=1}^N r_{ij}}{N}$$

Gleichung 2: Berechnung der Kriteriengewichtung (Ahmed et al., 2022)

(4) Bewertung

Die Bewertung soll mit Hilfe der „Technique for Order Preferences by Similarity“ (TOPSIS) durchgeführt werden. Diese beruht auf einer Aggregationsfunktion, die die relative Nähe zu den idealen und nicht-idealen Werten als Referenzebene darstellt (Garcia-Bernabeu et al., 2020). Dabei entsprechen die besten bzw. schlechtesten Werte der Kriterien in der gewichteten normierte Entscheidungsmatrix, der idealen

bzw. nicht-idealen hypothetischen Lösung jedes Kriteriums, abhängig vom jeweiligen Ziel (Maximierung oder Minimierung) (dos Santos Gonçalves and Campos, 2022).

Zunächst erfolgt die Normierung der Bewertungsmatrix zufolge Gleichung 3, wobei m die Anzahl der Alternativen angibt.

$$\bar{x}_{rw} = \frac{x_{rw}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m (x_{rw}^2)}}$$

Gleichung 3: Normierung der Bewertungsmatrix (Ahmed et al., 2022)

Anschließend wird die Kriteriengewichtung mit dem jeweiligen normierten Alternativen-Wert multipliziert, um eine gewichtete normierte Entscheidungsmatrix, engl. Weighted Normalized Decision Matrix (WNDM) zu erhalten. Anhand der WNDM werden für jedes Kriterium die beste (V_w^+) bzw. schlechteste (V_w^-) hypothetische Ideallösung ermittelt, die die beste bzw. schlechteste Bewertung darstellen, vgl. Gleichung 4 (Ahmed et al., 2022; Stankevičienė and Nikanorova, 2020).

$$V^* = \{V_1^*, V_2^*, \dots, V_n^*\} = \left\{ (c), \left(\frac{\min_j w_i r_{ij}}{i \in I_2} \right) \right\}$$

$$V^* = \{V_1^*, V_2^*, \dots, V_n^*\} = \left\{ \left(\frac{\min_j w_i r_{ij}}{i \in I_2} \right), \left(\frac{\max_j w_i r_{ij}}{i \in I_2} \right) \right\}$$

Gleichung 4: Maximierung und Minimierung der Kriterien (Stankevičienė and Nikanorova, 2020)

Der nächste Schritt ist die Berechnung der euklidischen Distanz zur besten und schlechtesten hypothetischen Ideallösung unter Verwendung der Gleichung 5 und Gleichung 6.

$$S_r^+ = \sqrt{\sum_{w=1}^m (V_{rw} - V_w^+)^2}$$

Gleichung 5: Euklidischen Distanz zur besten hypothetischen Ideallösung (Ahmed et al., 2022)

$$S_r^- = \sqrt{\sum_{w=1}^m (V_{rw} - V_w^-)^2}$$

Gleichung 6: Euklidischen Distanz zur schlechtesten hypothetischen Ideallösung (Ahmed et al., 2022)

Anschließend werden die Leistungskennzahlen der einzelnen Alternativen anhand Gleichung berechnet.

$$C_r = \frac{S_r^-}{S_r^- + S_r^+}$$

Gleichung 7: Berechnung der Leistungskennzahlen (Ahmed et al., 2022)

Endgültige Rangfolge

Abschließend erfolgt die Ermittlung der endgültigen Rangfolge auf Basis ihrer Leistungskennzahl, wobei die höchste Kennzahl für die beste Alternative, die zweithöchste Kennzahl für die zweitbeste Alternative etc. steht (Ahmed et al., 2022).

4 Systematische Literaturrecherche und bibliometrische Analyse

Im nachfolgenden Kapitel wird die systematische Literaturrecherche geplant, unter Zuhilfenahme des Bibliometrix Tools durchgeführt und die Ergebnisse abschließend präsentiert. Zu Beantwortung der Forschungsfrage F3 wird zudem ein Kodierungsrahmenwerk zu Kategorisierung bzw. Klassifizierung der Literatur entwickelt. Die Aufbereitung der thematischen Analyse erfolgt in zwei Schritten. Zunächst wird ein Überblick über die Ergebnisse gegeben und anschließend erfolgt eine kurze Beschreibung der einzelnen Methoden. Diese Beschreibung soll Aufschlüsse über die Zuordnung zu den einzelnen Kategorien des Kodierungsrahmenwerks geben.

4.1 Planung und Durchführung der systematischen Literaturrecherche

Stufe I – Planung des Reviews

Da die Festlegung des Bedarfs an einem Review (**Phase 0**) bereits in Kapitel 3.1.1 „Notwendigkeit einer systematischen Literaturrecherche“ thematisiert wurde, sowie eine Ausarbeitung eines Vorschlags für den Review (**Phase 1**) mit Kapitel 3.1.2 „Theoretischer Hintergrund systematische Literaturrecherche“ abgedeckt ist, ist die Stufe 1 der SLR bereits abgeschlossen und wird in diesem Kapitel nicht erneut aufgegriffen. Für die Protokollierung der Ergebnisse (**Phase 2**) wird auf das in Kapitel 3.1.2 vorgestellte SPAR-4-SLR Protokoll nach Paul et al. (2021) verwiesen, vgl. Abbildung 8.

Stufe II – Durchführung des Reviews

Als Basis für die SLR soll das Paper „A literature review on circular economy adoption in the manufacturing sector“ von Acerbi und Taisch (2020) dienen, wobei der Suchzeitraum bis Juli 2022 erweitert wird. Da die Literatur im Bereich CE mittlerweile sehr umfangreich ist, ist es essenziell den Umfang der Untersuchung ausschließlich auf jene Werke zu beschränken, die zur Beantwortung der Forschungsfrage beitragen. Gleichwohl ist es notwendig die Sucheingabe so breit gefächert wie nötig aufzustellen, um eine möglichst umfassende und vollständige Ergebnisliste an Methoden und Ansätzen zur Einführung zirkulärer Wertschöpfung zu generieren. Die Selektion geeigneter Schlüsselwörter und Booleschen Operatoren wird demzufolge, in Anlehnung an Acerbi und Taisch (2020), auf folgende Kombination an Schlüsselwörtern beschränkt (**Phase 3**): (*"circular economy" AND "manufacturing"*) OR *"circular manufacturing"*). Die am weitesten verbreiteten wissenschaftlichen Datenbanken für die Literaturrecherche sind gemäß Gholami et al. (2021) Scopus und

Web of Science (WOS). In dieser Arbeit wird ausschließlich auf die Datenbank Scopus zurückgegriffen, da diese die größten Datensätze von State-of-the-Art Literaturquellen umfasst (Gholami et al., 2021).

Der Erfassungsprozess wurde mit 07.Juli 2022 beendet (**EK1**), wobei sich die thematische Analyse der Ergebnisse auf den Zeitraum zwischen Juli 2019 – Juli 2022 beschränkt. Für Publikationen vor Juli 2019 ist auf das Paper von Acerbi und Taisch (2020) zu verweisen. Die vorliegende Recherche konzentriert sich auf peer-reviewed Artikel und Reviews (**EK2**) publiziert in Fachzeitschriften (**EK3**), die in englischer Sprache (**EK4**) erschienen sind. Konferenz Papers werden nicht miteinbezogen, da gemäß Acerbi und Taisch die dabei angeführten CE-Konzepte missverständlich sind und nicht mit der CE-Definition von Ellen MacArthur (Ellen MacArthur Foundation, 2013) in Einklang zu bringen sind. Zudem werden nur Publikationen analysiert, die frei zugänglich sind (**EK5**). Damit konnten die 1534 Papers die, die erste Sucheingabe ergab, auf 548 Papers reduziert werden, die als Input für die deskriptive Analyse dienen (**Phase 4**). Die verwendeten Einschlusskriterien lassen sich wie folgt zusammenfassen:

| Bezeichnung | Einschlusskriterium |
|-------------|--|
| EK1 | Zeitraum: bis inkl. Juli 2022 |
| EK2 | Dokumententyp: Peer-reviewed Artikel und Reviews |
| EK3 | Quellenart: Journal |
| EK4 | Sprache: Englisch |
| EK5 | Zugriff: Freier Zugang |
| EK6 | Publikationsphase: Final |

Tabelle 4: Systematische Literaturrecherche Einschlusskriterien

Der Ausschluss von Literatur schließt gemäß Booth et al. (2021) eine Qualitätsbewertung (**Phase 5**) ein, die die Überprüfung der Gültigkeit, Zuverlässigkeit, Anwendbarkeit und Relevanz beinhaltet (Booth et al., 2021). Zur Qualitätsbewertung wurde ein iteratives Verfahren herangezogen, das dem dreiteiligen Screening-Prozess von Grenz-Farenholtz (2013) folgt (vgl. Abbildung 15). Die dabei verwendeten Ausschlusskriterien wurden zufolge des Forschungsziels ausgewählt, wobei sie sich ausschließlich auf den Inhalt der Papers beziehen, vgl. Tabelle 5. Mit ihnen wird gewährleistet, dass sich die erhaltenen Ergebnisse auf CM Methoden und Ansätze mit Fokus auf produzierende Unternehmen und technischen Ressourcenkreisläufen und nicht auf allgemeine Nachhaltigkeitsansätze beschränken. In der nachfolgenden Tabelle wird ein Überblick über die verwendeten Ausschlusskriterien gegeben.

| Bezeichnung | Ausschlusskriterium |
|-------------|---|
| AK1 | Chemische Umwandlungsprozesse & Entwicklung neuer Materialien |
| AK2 | Organischer Kreislauf |
| AK3 | Bausektor |
| AK4 | Luftfahrtsektor |
| AK5 | Textilindustrie |
| AK6 | Nicht Kreislaufwirtschaft |
| AK7 | Keine Methode, Tool oder Technologie angeführt |
| AK8 | Nicht Mikroebene |

Tabelle 5: Systematische Literaturrecherche Ausschlusskriterien

Ausgehend von den 548 Werken, die sich unter Einbezug der Einschlusskriterien ergab, wurde ein erstes Screening der Papers anhand des Titels durchgeführt, wobei die Literatur in drei Kategorien eingeteilt wurde. Artikel, die mindestens eines der Ausschlusskriterien erfüllen, wurden als, für diese Arbeit, nicht relevant eingestuft, rot gekennzeichnet und nicht weiter berücksichtigt (n=210). Relevant eingestufte Literatur wurde grün markiert (n=180) und jene Werke, die anhand des Titels nicht klassifiziert werden konnten, wurden der gelben Kategorie zugeteilt, in Abbildung 15 strichliert gekennzeichnet (n=158). In der zweiten Iteration wurden der Abstrakt analysiert und weitere 73 Papers exkludiert. Im vorletzten Iterationsschritt erfolgt die Volltext Analyse der einzelnen Werke, wodurch sich die Gesamtanzahl der, als relevant erachteten, Literaturquellen auf 152 reduzierte, wobei 75 dieser Werke (in Abbildung 15 grau markiert) bereits durch das Paper von Acerbi und Taisch (2020) abgedeckt werden. Die restlichen 77 Werke wurden gemäß Wohlin (2014) mittels „Backward Snowballing“ Verfahren auf insgesamt 137 Papers erweitert (**Phase 6 & Phase 7**), die schlussendlich einer thematischen Analyse unterzogen wurden (Wohlin, 2014). Duplikate, die sich aus den „Snowballing“-Verfahren ergeben bzw. Werke, die mindestens einen der Ausschlusskriterien entsprechen, sind dabei bereits exkludiert.

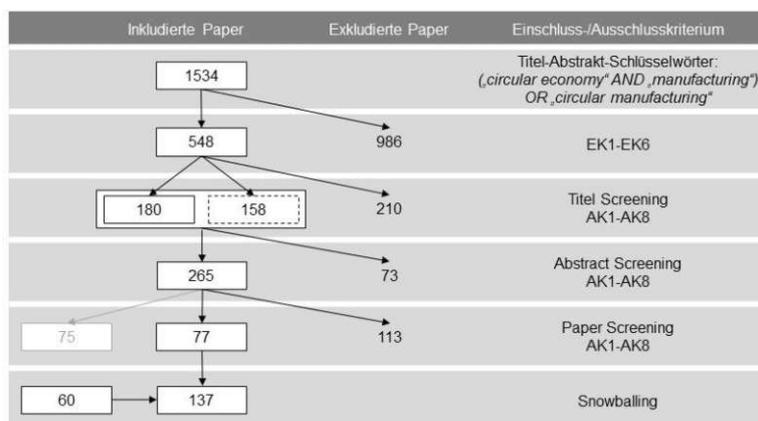


Abbildung 15: Iteratives Ein- und Ausschlussverfahren zur Qualitätsbewertung der Literatur

Stufe III – Berichterstattung und Dissemination

Aus Basis der erhaltenen Suchergebnisse erfolgt in den nachfolgenden Kapiteln (Kapitel 4.2 & 4.3) eine Zusammenfassung der Ergebnisse in Form der deskriptiven bibliometrischen und thematischen Analyse. Die deskriptive Analyse stützt sich dabei auf Standard-Analyseindikatoren und wird mit Hilfe des Analysetools Bibliometrix durchgeführt. Für die thematische Analyse werden die Ergebnisse der deskriptiven bibliometrischen Analyse in Kombination mit einer weiteren Literaturrecherche zum Thema „Kategorisierung und Kreislaufwirtschaft“ herangezogen. Damit wird versucht, ein Kodierungsrahmenwerk zu entwickeln, welche in die Kreislaufwirtschaft Definition von Kirchherr et al (2017) eingebettet werden kann. Die Literaturrecherche für die Kategorisierung wird ebenfalls in Scopus durchgeführt. Da die Sucheingabe („Circular Economy“ AND „Categorization*“) zu keinem aussagekräftigen Ergebnis führte, wurde die Suche zufolge des Snowballing-Prinzips erweitert. Es konnte jedoch keine Publikation identifiziert werden, die sich mit der Kategorisierung von CM Methoden und Ansätzen auseinandersetzt. Die nachfolgenden fünf Dimensionen für Kategorisierung bzw. Klassifizierung der CM Methoden und Ansätze basieren deshalb primär auf den Ergebnissen der deskriptiven Analyse und werden durch Meta-Literaturanalysen unterschiedlicher Forscher:innen begründet. Übergeordnet wird mit dem vorgestellten Kodierungsrahmen versucht, die Bewertungsprozesse der CM Methoden und Ansätze zu erleichtern und damit Forschungsfrage F4 zu adressieren.

(1) Nachhaltigkeitsdimension

Wie bereits in Kapitel 2.2.2 erörtert, hat sich das Drei-Säulen-Modell, aufgeteilt in Ökonomie, Ökologie und Soziales, in Politik und Wissenschaft durchgesetzt, um das Nachhaltigkeitsparadigma zu beschreiben. Nicht nur Kirchherr et al. (2017) greift in seinem Kodierungsrahmen zur Definition des Kreislaufwirtschaftsbegriffs jene Kategorie auf, sondern auch Autoren wie Acerbi und Taisch (2020) oder Ávila-Gutiérrez et al. (2020), die sich in ihren Werken mit der Kategorisierung von CE Strategien auseinandersetzen (Acerbi and Taisch, 2020; Ávila-Gutiérrez et al., 2020; Kirchherr et al., 2017). Aufgrund dessen wurde diese Dimension in den Kodierungsrahmen aufgenommen.

(2) Systemperspektive

Die Systemperspektive wird ebenfalls von Kirchherr et al. (2017), Acerbi und Taisch (2020) bzw. Ávila-Gutiérrez et al. (2020) aufgegriffen und spielt gleichwohl in der Publikation von Sitadewi et al. (2021) und Lim et al. (2022) eine essenzielle Rolle bei der Einteilung der CE Prinzipien (Lim et al., 2022; Sitadewi et al., 2021). Dabei wird zwischen Micro-, Meso- und Macro-Perspektive unterschieden, nähere Details hierzu finden sich in Kapitel 2.3.1. Die Systemperspektive wird deshalb als Kategorie eingeführt.

(3) CE Strategie

Neben der Einteilung gemäß Nachhaltigkeitsdimension und Systemperspektive, soll das R-Rahmenwerk der Kreislaufwirtschaft ebenfalls in das Kodierungsrahmenwerk dieser Arbeit aufgegriffen werden. In Einklang mit dem Werk von Zhang et al. (2022) erfolgt deshalb eine Unterteilung in „Pre-Use“, „Use“ und „Post-Use“ Phase. Während die Pre-Use Phase die intelligente Nutzung und Herstellung von Produkten und Infrastruktur beinhaltet, Stichwort Refuse, Rethink und Reduce, befassen sich Methoden und Ansätze, die der Use-Phase zugeordnet werden, mit Lebensdauermaximierung von Produkten, Komponenten und Infrastruktur (Reuse, Repair, Refurbish, Remanufacture, Repurpose). Mit der Zuordnung zur Post-Use Phase werden alle Methoden und Ansätze abgedeckt, bei denen auf eine Wiederverwertung von Materialien zurückgegriffen wird. Da die Reihenfolge der Phasen einer Hierarchie folgt, demzufolge die erste Phase der zweiten und die zweite der dritten zu priorisieren ist, findet in dieser Kategorie gewissermaßen eine Reihung der Methoden bzw. Ansätze statt.

(4) Art

Innerhalb der bibliometrischen Analyse kristallisieren sich zwei unterschiedliche Arten von CM Ansätze zur Einführung zirkulärer Wertschöpfung in Produktionsunternehmen heraus. Einerseits Methoden bzw. Tools, welche primär für die Bewertung und Überwachung der Zirkularität und im Entscheidungsfindungsprozess eingesetzt werden, und andererseits Technologien, die zur physischen Implementierung dienen und ebenfalls bei der Entscheidungsfindung unterstützen. Zu einer ähnlichen Erkenntnis kommen die Forscher:innen im Paper von Acerbi und Taisch (2020), was eine Aufnahme in den entwickelten Kodierungsrahmen begründet.

(5) Aufgabenbereich

Wie bereits in der vorhergehenden Dimension erläutert, verfolgten die identifizierten Methoden/Tools bzw. Technologien unterschiedliche Zielsetzungen. Die ermittelten CM Methoden, Tools bzw. Technologien werden für unterschiedliche Aufgabenbereiche eingesetzt, die sich in drei Kategorien unterteilen lassen: Entscheidungsfindung, Physische Implementierung und Bewertung & Überwachung der Zirkularität. Diese Erkenntnis deckt sich auch mit denen von Acerbi und Taisch (2020), weshalb die Kategorie „Aufgabenbereich“ implementiert wird.

Abbildung 16 gibt einen Überblick über das entwickelte Kodierungsrahmenwerk, welches für die thematische Analyse der Literatur verwendet wurde.

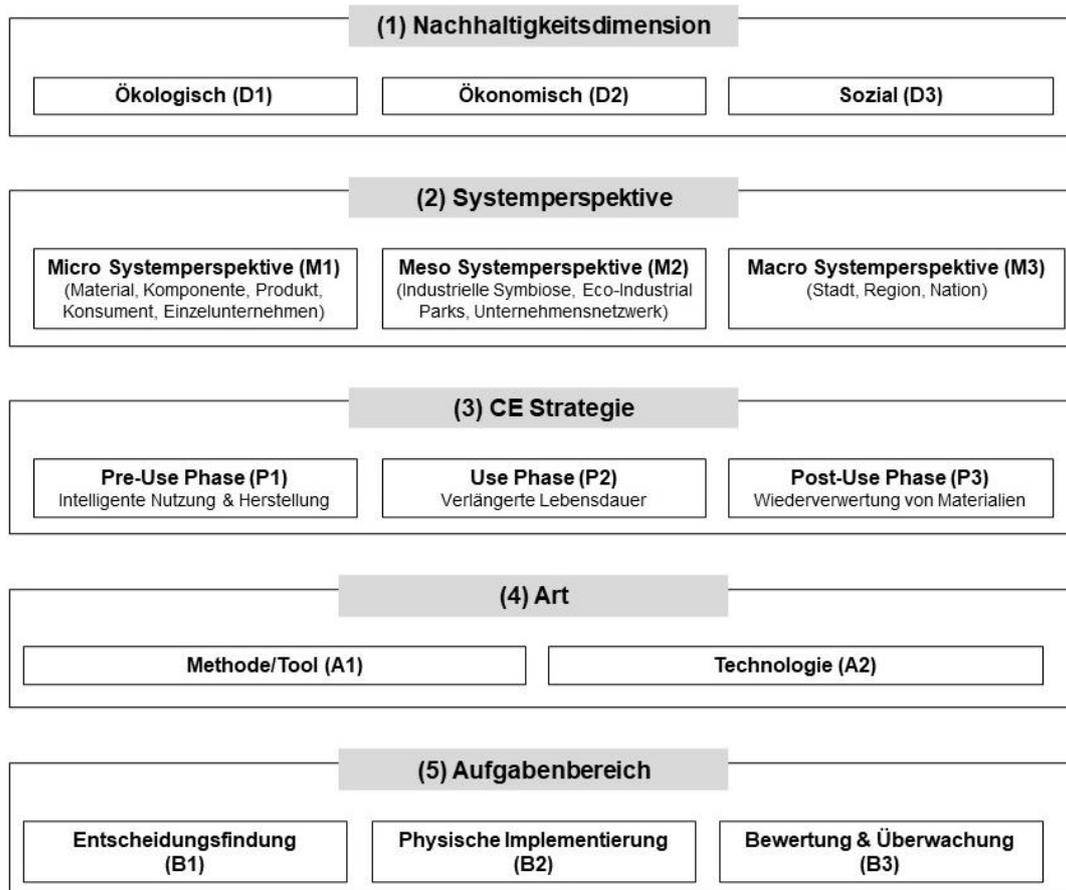


Abbildung 16: Entwickelter Kodierungsrahmen zur thematischen Analyse der Literatur

4.2 Ergebnisse der deskriptiven Analyse

Die deskriptive Analyse stützt sich auf Standard-Analyseindikatoren. Zu den Analyseindikatoren gehören: (1) die jährliche und kumulative Anzahl an Publikationen, (2) die Verteilung der Veröffentlichungen gemäß Herkunftsland, (3) die Verteilung der Veröffentlichungen gemäß Geldgeber bzw. Förderer, (4) die Verteilung der Veröffentlichung auf Grundlage der Quelle, (5) die verwendeten Schlüsselwörter. Die verwendete Sucheingabe inklusive der Einschlusskriterien (EK1-EK6) ist Tabelle 6 zu entnehmen.

| Datum | Sucheingabe | Ergebnis |
|------------|--|----------|
| 07.07.2022 | TITLE-ABS-KEY (("circular economy" AND "manufacturing") OR "circular manufacturing") AND (LIMIT-TO (DOCTYPE , "ar") OR LIMIT-TO (DOCTYPE , "re")) AND (LIMIT-TO (PUBSTAGE , "final")) AND (LIMIT-TO (SRCTYPE , "j")) AND (LIMIT-TO (LANGUAGE , "English")) AND (LIMIT-TO (OA , "all")) | 548 |

Tabelle 6: Sucheingabe systematische Literaturrecherche

Wachstum des Forschungsinteresse

Um die zeitliche Entwicklung der Literatur zu veranschaulichen, werden die Publikationen nach dem Erscheinungsjahr gegliedert (Abbildung 17). Die Gesamtanzahl, der pro Jahr veröffentlichten Publikationen soll dabei als Bestandsaufnahme im Forschungsbereich „Circular Manufacturing“ fungieren und einen Überblick über aktuelle und zukünftige Trends geben.

Die Analyse des Wachstums des Forschungsthemas zeigt, dass der Forschungsbereich jung ist. Die erste Veröffentlichung stammt aus dem Jahr 2012, „Moving toward the circular economy: The role of stocks in the Chinese steel cycle“. In den darauffolgenden Jahren ist ein minimales Wachstum des Forschungsinteresses zu vermerken. Ab dem Jahr 2017 ist eine signifikante Zunahme zu beobachten, wie der deutliche Anstieg der kumulativen Anzahl an Veröffentlichungen in diesem Jahr zeigt, vgl. Abbildung 17. Ähnliche Trends können in den darauffolgenden Jahren abgeleitet werden. Die höchste Anzahl an jährlichen Veröffentlichungen wurde mit 201 Dokumenten im Jahr 2021 verzeichnet, in der sich die Anzahl der jährlichen Veröffentlichungen verdoppelte. Für das Jahr 2022 ist, unter Anbetracht des sukzessiven Anstiegs an jährlichen Publikationen, davon auszugehen, dass die Zahl der jährlichen Veröffentlichung erneut zunehmen wird. Die Analyse zeigt, dass rund 86% der Publikationen in diesen Forschungsbereich nach 2019 entstanden. Diesen Tatsachen zugrundeliegend lässt sich ableiten, dass angesichts des weltweit signifikant steigenden Forschungsinteresses, „Circular Manufacturing“ eine wachsende Bedeutung in der Forschung zukommt.

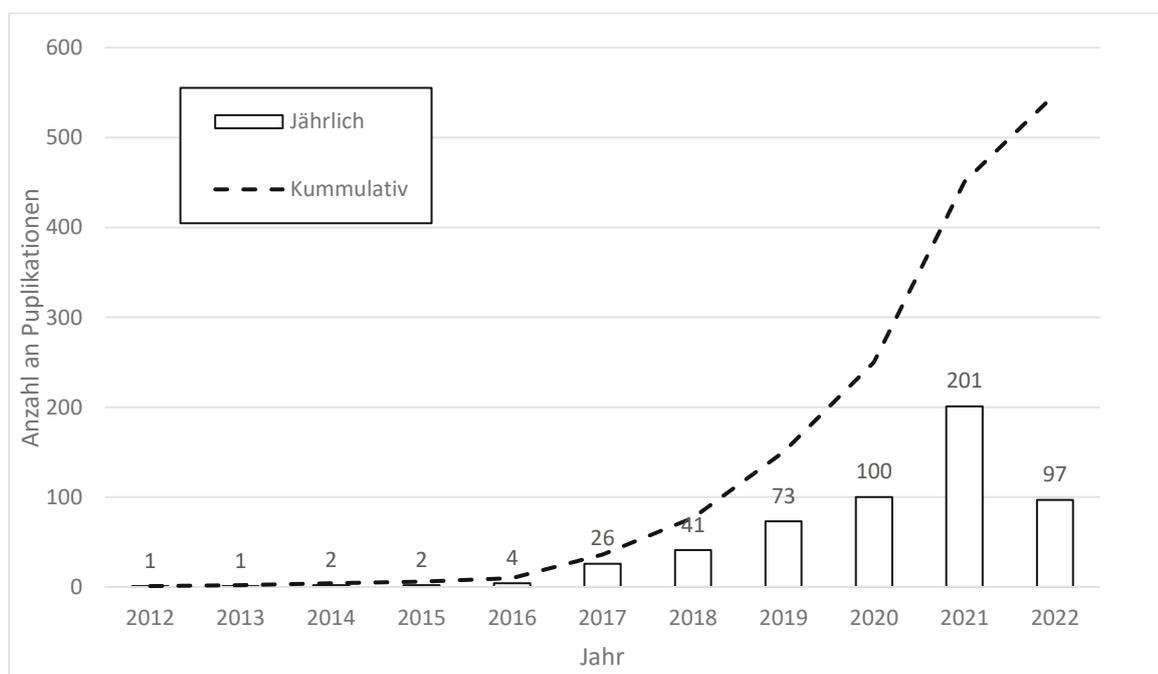


Abbildung 17: Jährliche und kumulative Anzahl an Publikationen im Bereich „Circular Manufacturing“ zufolge Scopus

Weltweite Verteilung der Publikationen

Der nachfolgende Abschnitt beschreibt die länderspezifische Beteiligung an Veröffentlichungen zum Thema „Circular Manufacturing“. Ein Vergleich der Gesamtanzahl der Veröffentlichungen mit der Anzahl an Dokumenten pro Land, in denen die einzelnen Dokumente zitiert wurden, soll dazu beitragen, dass weitere Implikationen abgeleitet werden können.

Insgesamt wurden 71 Länder identifiziert, aus denen die veröffentlichten Publikationen stammen. Abbildung 18 zeigt die Streuung der 15 führenden Länder in diesem Themenbereich, welche für 72 % der gesamten Veröffentlichungen verantwortlich sind. Aus der Analyse geht hervor, dass das Vereinigte Königreich mit einer Gewichtung von rund 15% an erster Stelle steht, gefolgt von Italien mit 10% und Spanien mit 8%. Obwohl im Vereinigten Königreich die meisten Dokumente veröffentlicht wurden, ist China das Land mit den meisten Zitaten. Eine ähnliche Tendenz lässt sich auch für Indien ableiten.

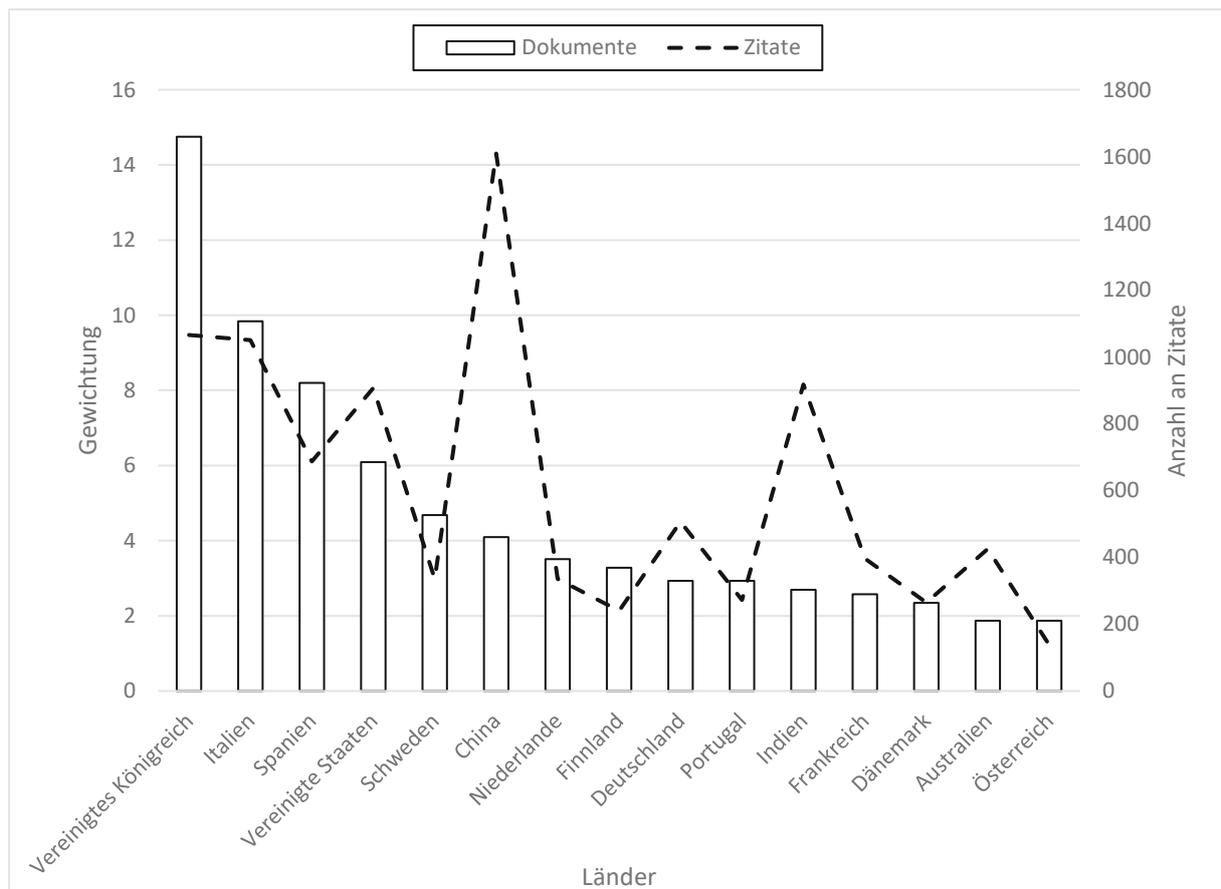


Abbildung 18: Verteilung der Veröffentlichungen gemäß Herkunftsland (Top 15) im Bereich „Circular Manufacturing“ zufolge Scopus

Verteilung der Fördermittelgeber

Abbildung 19 gibt einen Überblick über die Top 10 Sponsoren, die zur Finanzierung neuer Forschungsideen und Technologien im Themenbereich beitragen. Die Europäische Kommission ist, mit 60 Dokumenten, dabei mit Abstand der Fördermittelgeber der meisten Publikationen. An zweiter Stelle steht das „Engineering und Physical Science Resource Council“ mit 32 Publikationen, dicht gefolgt vom „Horizon 2020 Framework Programme“ mit 31 Publikationen.

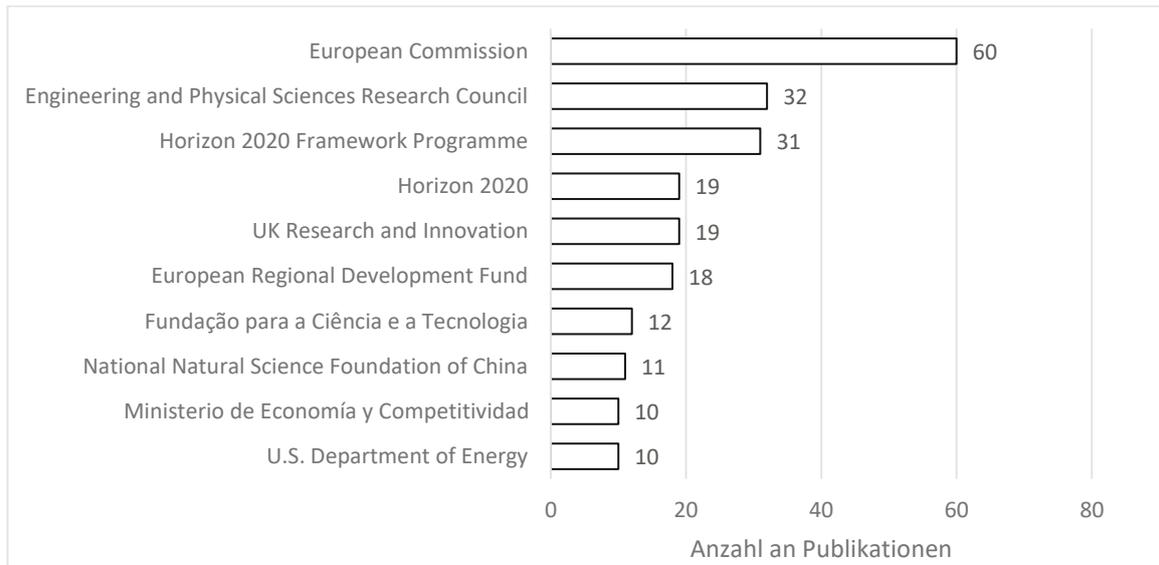


Abbildung 19: Verteilung der Veröffentlichungen nach Fördermittelgeber (Top 10) im Bereich „Circular Manufacturing“ zufolge Scopus

Proaktivste Fachzeitschriften

In Abbildung 20 sind die 5 wichtigsten Fachzeitschriften der Sucheingeabe, gereiht nach Anzahl an Veröffentlichungen zu sehen. Die erste Stelle nimmt mit 116 Publikationen das Journal „Sustainable Switzerland“ ein, gefolgt vom „Journal of Cleaner Production“ mit 44 und der Fachzeitschrift „Resources Conservation and Recycling“.

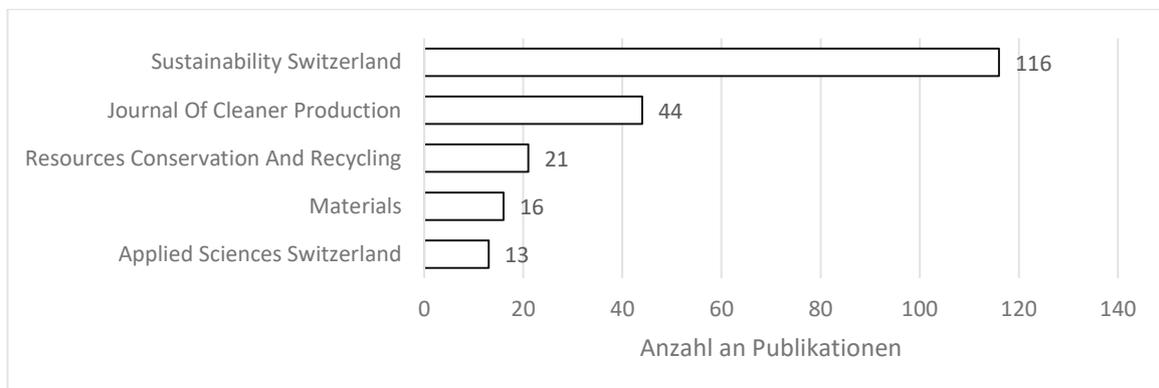


Abbildung 20: Verteilung der Veröffentlichung auf Grundlage der Fachzeitschrift (Top 5) im Bereich „Circular Manufacturing“ zufolge Scopus

Häufigste Schlüsselwörter

Die Ergebnisse der Untersuchung der Schlüsselwörter im Bereich Circular Manufacturing werden mit Hilfe der Biblioshiny-Weboberfläche aufbereitet und in Form eines Schlüsselwort-Koinzidenznetzwerk dargestellt. Diese soll die Verteilung der Kernthemen und deren Beziehung untereinander aufdecken. Die Nähe der einzelnen Schlüsselwörter, dargestellt in Knotenpunkten, gibt dabei ihre Relevanz füreinander und Interaktion miteinander an (van Eck and Waltman, 2010). Die Schlüsselwörter wurden auf Basis des Titels und Abstracts der Publikationen extrahiert. In Abbildung 21 wird das Koinzidenznetzwerk der 50 häufigsten Schlüsselwörter dargestellt. Insgesamt wurden 3288 Schlüsselwörter identifiziert. Zu den am meisten verwendeten Schlüsselwörter zählen Recycling, Kreislaufwirtschaft, Produktion und nachhaltige Entwicklung. Da innerhalb der Sucheingabe in Scopus sowohl der Begriff „Kreislaufwirtschaft“ als auch „Produktion“ aufgegriffen wurde, erscheint dieses Ergebnis nicht überraschend, und zeigt vielmehr, dass die Sucheingabe erfolgreich war. Besonders hervorzuheben ist, dass bereits mehrere CM Methoden und Ansätze, darunter Produkt Design, LCA und 3D Druck, die darauffolgend in der thematischen Analyse identifiziert wurden, auch innerhalb des Koinzidenznetzwerk mit den 50 am häufigsten verwendeten Schlüsselwörter anzutreffen sind, vgl. Abbildung 21. Eine Auflistung der Top 50 Schlüsselwörter, inklusive prozentuelle Häufigkeiten, kann dem Anhang entnommen werden.

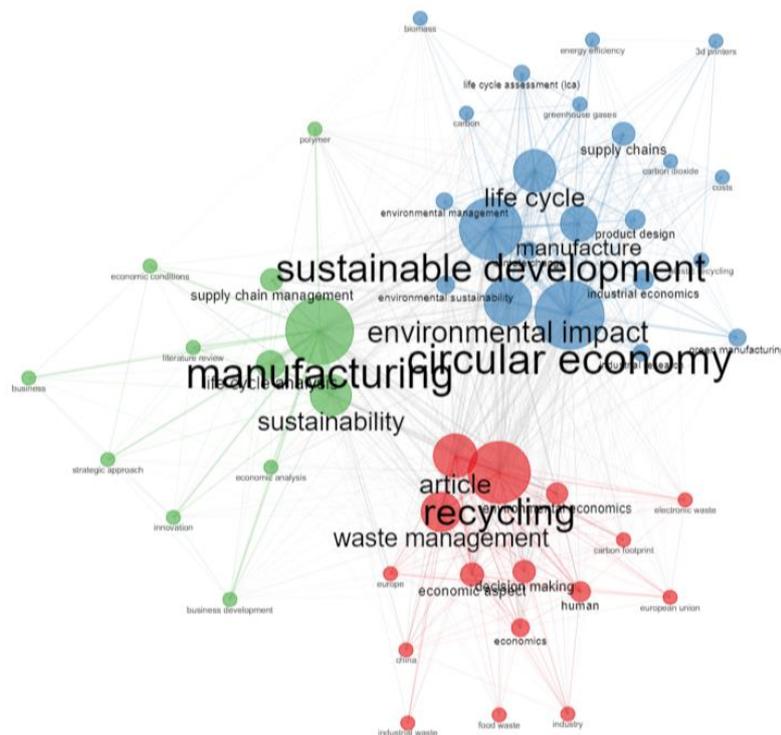


Abbildung 21: Schlüsselwörter Koinzidenznetzwerk

4.3 Ergebnisse der thematischen Analyse

Die thematische Untersuchung dieser Arbeit beruht auf dem in Kapitel 4.1 vorgestellten Kodierungsrahmenwerk. Insgesamt konnten 47 CM Methoden bzw. Ansätze ausfindig gemacht werden. Aus Zwecken der Übersichtlichkeit und des Verständnisses werden den einzelnen Methoden bzw. Ansätzen Nummern zugewiesen und die englische Nomenklatur beibehalten, vgl. Tabelle 7.

| Nr. | Name | Referenz |
|-----|---------------------------------------|--|
| 1 | VSM | (Abideen and Mohamad, 2020; Bocken et al., 2013; Hedlund et al., 2020; Hernandez Marquina et al., 2021; Howard et al., 2022; J. K. Y. Lee et al., 2021) |
| 2 | TRIZ Methode | (Spreafico and Landi, 2022) |
| 3 | Resource Pressure Methode | (Desing et al., 2021) |
| 4 | RIFF | (Lindkvist Haziri and Sundin, 2020) |
| 5 | Modular design support system | (Stavropoulos et al., 2019) |
| 6 | Engineering Design Method | (Evrard et al., 2021; Torcătoru et al., 2022a) |
| 7 | Eco-Design | (Margallo et al., 2021; Martínez-Cámara et al., 2021a; Miettunen and Santasalo-Aarnio, 2021; Torcătoru et al., 2022a; Vacchi et al., 2021) |
| 8 | CCET | (Kamp Albæk et al., 2020) |
| 9 | Circular Product Design | (Asif et al., 2021; Howard et al., 2022; Shahbazi and Jönbrink, 2020; Torcătoru et al., 2022b) |
| 10 | Recyclability Assessment Method | (Roithner et al., 2022) |
| 11 | Orientation Events | (Howard et al., 2022) |
| 12 | General Morphologic Analysis | (Franco et al., 2021; Negri et al., 2021) |
| 13 | Circularity Measurement Toolkit | (Garza-Reyes et al., 2019) |
| 14 | Multi-Criteria Decision Making | (Bagalagel and EIMaraghy, 2021; Daniyan et al., 2020; S. Y. Lee et al., 2021; Zhang et al., 2021) |
| 15 | Multi-Group Decision-Making Technique | (Kamble et al., 2021) |
| 16 | Decision Making Support Tools | (Makarova et al., 2018a; Sergio et al., 2022) |
| 17 | Circularity Indicator Tool | (Trollman et al., 2021) |
| 18 | Package-to-Product (PtP) Indikator | (Šerešová and Kočí, 2020) |
| 19 | Environmental Performance Indicator | (Hummen and Desing, 2021) |
| 20 | Ecological Rucksack | (Daozhong et al., 2011) |
| 21 | Embedded Energy Analysis | (Liu et al., 2017) |
| 22 | Failure Analysis Method | (Kimita et al., 2021) |
| 23 | Trade-Off Analysis | (Kravchenko et al., 2020) |
| 24 | Life Cycle Gap Analysis | (Dieterle et al., 2018) |
| 25 | Material Flow Analysis | (Krausmann et al., 2009) |
| 26 | Input-Output Analysis | (Nakamura and Kondo, 2018) |
| 27 | Maturity Model | (Golinska-Dawson et al., 2021; Sacco et al., 2021) |
| 28 | LCA | (Abbate et al., 2022; Ávila-Gutiérrez et al., 2020; Bjørnbet and Vildåsen, 2021; Chen and Huang, 2019; Díaz-Ramírez et al., 2020; Dominguez et al., 2018; Du et al., 2015; García-Muiña et al., 2021; Gouveia et al., 2022; Hidalgo-Crespo et al., 2022; Lozano-Miralles et al., 2019; Martínez-Cámara et al., 2021a; Moretti et al., 2021; Morgan et al., 2022; Niero and Kalbar, 2019; Rebitzer et al., 2004; Rigamonti et al., 2017; Rybaczewska-Błażejowska and Masternak-Janus, 2021; Scheepens et al., 2016; Schulte et al., 2021; Tóth Szita, 2017; Zendoia et al., 2014) |

| | | |
|----|---------------------------------------|---|
| 29 | LCC | (Abbate et al., 2022; Asiedu and Gu, 1998; Ávila-Gutiérrez et al., 2020; Bengtsson and Kurdve, 2016; Díaz-Ramírez et al., 2020; Gouveia et al., 2022; Medina-Salgado et al., 2021) |
| 30 | Self-Assessment Readiness Tool | (Pigosso and McAlloone, 2021) |
| 31 | Change Readiness Measurement Tool | (Thorley et al., 2022) |
| 32 | Design Navigator | (Neramballi et al., 2020) |
| 33 | Product Service System | (Azarenko et al., 2009; Chen and Huang, 2019; Haber and Fargnoli, 2021; Kühl et al., 2022; Zheng et al., 2019) |
| 34 | Digital Passport | (Ellsworth-Krebs et al., 2022) |
| 35 | Adaptive Disassembly Planner | (Baazouzi et al., 2021) |
| 36 | Multi-Level Demand-Response Model | (Ma et al., 2020) |
| 37 | Programms and Algorithms | (Jayakumar et al., 2020; Karagiannopoulos et al., 2021; Lee et al., 2015; Rentizelas et al., 2022; Yin et al., 2021) |
| 38 | Additive Manufacturing | (Enyoghasi and Badurdeen, 2021; Ferreira et al., 2020; Gholami et al., 2021; Laskurain-Iturbe et al., 2021; Nascimento et al., 2018; Rahito et al., 2019; Romani et al., 2021; Saboori et al., 2019; Stock and Seliger, 2016; Turner et al., 2019) |
| 39 | AI (inkl. ML, AV, Neural Networks) | (Agrawal et al., 2022; Ajwani-Ramchandani et al., 2021; Deng et al., 2021; Enyoghasi and Badurdeen, 2021; Khayyam et al., 2021; Laskurain-Iturbe et al., 2021; Nañez Alonso et al., 2021; Noman et al., 2022; Nowakowski et al., 2020; Schlüter et al., 2021; Wang and Zhang, 2020; Wilts et al., 2021) |
| 40 | Big Data Analytics | (Agrawal et al., 2022; Blunck and Werthmann, 2017; Bressanelli et al., 2018a, 2018b; Enyoghasi and Badurdeen, 2021; Laskurain-Iturbe et al., 2021; Nascimento et al., 2018; Pham et al., 2019; Rizvi et al., 2021; Song and Moon, 2017; Tao et al., 2018) |
| 41 | Block-Chain | (Abideen et al., 2021; Agrawal et al., 2022; Ajwani-Ramchandani et al., 2021; Esmaeilian et al., 2020; Lähdeaho and Hilmola, 2020; Rehman Khan et al., 2022) |
| 42 | Cloud Computing | (Daniyan et al., 2021; Enyoghasi and Badurdeen, 2021; Fisher et al., 2020; Frank et al., 2019; Gholami et al., 2021; Song and Moon, 2017) |
| 43 | Cyber Physical System | (Abideen et al., 2021; Dev et al., 2020; Fisher et al., 2020; Gholami et al., 2021; Martín-Gómez et al., 2021; Patil et al., 2022) |
| 44 | IoT | (Abideen et al., 2021; Agrawal et al., 2022; Blunck and Werthmann, 2017; Bressanelli et al., 2018a, 2018b; Cioffi et al., 2020; Dev et al., 2020; Enyoghasi and Badurdeen, 2021; Esmaeilian et al., 2020; Fisher et al., 2020; Frank et al., 2019; Gholami et al., 2021; Kintscher et al., 2020; Laskurain-Iturbe et al., 2021; Liao, 2018; Manavalan and Jayakrishna, 2019; Pandian and Abdul-Kader, 2017; Pham et al., 2019; Rizvi et al., 2021; Shi et al., 2012; Tao et al., 2018; Vacchi et al., 2021) |
| 45 | Modelling & Simulation | (Abideen and Mohamad, 2020; Abideen et al., 2021, 2020; Charnley et al., 2019; Enyoghasi and Badurdeen, 2021; Fisher et al., 2020; Gholami et al., 2021; Goodall et al., 2019; Hashemi et al., 2022; Kalaboukas et al., 2021, 2021; Lee et al., 2015; Roci et al., 2022b, 2022a; Song and Moon, 2017; Tao et al., 2018; Turner et al., 2022) |
| 46 | Robotics | (Hjorth and Chrysostomou, 2022; Khan et al., 2021; Laskurain-Iturbe et al., 2021; Noman et al., 2022; Poschmann et al., 2021; Wilts et al., 2021) |
| 47 | Virtual and Augmented Reality | (Enyoghasi and Badurdeen, 2021; Gholami et al., 2021; Laskurain-Iturbe et al., 2021; Tao et al., 2018) |

Tabelle 7: Nummerierung CM Methoden und Ansätze

4.3.1 Zusammenfassung

Innerhalb der deskriptiven Analyse kristallisieren sich zwei unterschiedliche Arten von CM Ansätzen zur Einführung zirkulärer Wertschöpfung in Produktionsunternehmen heraus. Einerseits Methoden bzw. Tools (A1), welche primär für die Bewertung und Überwachung der Zirkularität (B3) und im Entscheidungsfindungsprozess (B1) eingesetzt werden und andererseits Technologien (A2), die zur physischen Implementierung (B2) dienen und ebenfalls als Unterstützungshilfe während der Entscheidungsfindung (B1) herangezogen werden. Alle 47 CM Methoden und Ansätze konnten einem oder mehreren dieser drei Aufgabenbereiche zugeordnet werden. Die Ökobilanzierung (LCA) kann beispielsweise sowohl für nachhaltigkeitsorientierte Entscheidungsfindung eingesetzt werden, als auch als Hilfsmittel bei der physischen Implementierung, oder zur Bewertung und Überwachung der Zirkularität. So untersuchen Hidalgo-Crespo et al. (2022) unter Zuhilfenahme der LCA die potenziellen Umweltauswirkungen, die durch das zuvor entwickelte Szenario der Kreislaufwirtschaft vermieden werden können, oder García-Muina et al. (2021) versuchen mit Hilfe der SO-LCA die soziale Performance von Unternehmen zu überwachen (Z3). In Kombination mit anderen CM Methoden, wie mit PSS (Chen and Huang, 2019; Scheepens et al., 2016) oder mit Eco-Design (Martínez-Cámara et al., 2021b), wird LCA unter anderem eingesetzt um die Ressourceneffizienz zu steigern, das Produktdesign zu verbessern und damit die Lebensdauer der Produkte zu verlängern (Z2). Eine Durchführung mehrere Ökobilanzen von unterschiedlichen Produkten oder Unternehmen, ermöglicht einen direkten Vergleich der unterschiedlichen Alternativen und kann somit direkt den Entscheidungsfindungsprozess unterstützen. Zum Beispiel verwenden die Autoren Morgan et al. (2022) die Methode, um die bestehenden Verpackungs- und Vertriebstechniken mit drei nachhaltigeren Alternativen zu vergleichen und eine Entscheidung zu treffen (Z1), die langfristig zur Verringerung des ökologischen Fußabdrucks der Wertschöpfungskette beitragen soll.

Auf Basis der inhaltlichen Analyse können die einzelnen Methoden, Tools bzw. Technologien zudem den einzelnen Phasen der Kreislaufwirtschaft zufolge BMK (2021) zugeordnet werden. Es zeigt sich, dass die Mehrheit der identifizierten Methoden und Ansätze eine intelligente Nutzung und Herstellung von Produkten und Infrastruktur befähigen und damit der „Pre-Use Phase“ zuordbar sind. Einige der Methoden bzw. Ansätze, allen voran die I4.0 Technologien, lassen sich besonders vielseitig, beispielsweise innerhalb des Reparatur-, Remanufacturing- und Recyclingprozess einsetzen und werden deshalb nicht nur einer Phase zugeordnet, sondern mehreren. Ein Beispiel dafür sind Simulationen und Modelle, die in den unterschiedlichen Publikationen herangezogen werden, um Schwachstellen und Verschwendung im Produktionsprozess zu identifizieren (S1) (Enyoghasi and Badurdeen, 2021; Song and Moon, 2017), den Materialfluss in Remanufacturing-

Prozessen zu prognostizieren (S2) (Charnley et al., 2019; Goodall et al., 2019) oder eine Entscheidungshilfe beim Recycling zu bieten (S3) (Turner et al., 2022).

Die Untersuchung der Nachhaltigkeitsdimensionen zeigt, dass alle Methoden und Ansätze die ökologische Dimension berücksichtigen, die soziale Dimension jedoch überwiegend vernachlässigt wird. Arbeiten mit rein ökonomischem Fokus werden innerhalb des Identifikationsprozess der SLR, mit Hilfe der ausgewählten Ausschlusskriterien, exkludiert und sind deshalb, wie zu erwarten, in der thematischen Analyse nicht vertreten. Ein Beispiel für eine Technologie, die alle drei Nachhaltigkeitsdimensionen adressiert ist IoT. So lassen sich mit ihr unter anderem die Material- und Energieverbräuche, sowie Emissionen reduzieren (E1), Produktionsprozesse optimieren und dadurch Kosten senken (E2) und die Gesundheit des Personals sowie die Betriebssicherheit steigern (E3) (Blunck and Werthmann, 2017; Cioffi et al., 2020; Enyoghasi and Badurdeen, 2021; Esmailian et al., 2020; Fisher et al., 2020; Frank et al., 2019; Gholami et al., 2021; Kintscher et al., 2020; Laskurain-Iturbe et al., 2021; Liao, 2018; Pandian and Abdul-Kader, 2017; Shi et al., 2012; Tao et al., 2018; Wang et al., 2016). Die Ergebnisse der Analyse auf Basis der Nachhaltigkeitsdimension kann aus den nachfolgenden Schnittmengen-Modell entnommen werden, vgl. Abbildung 22.

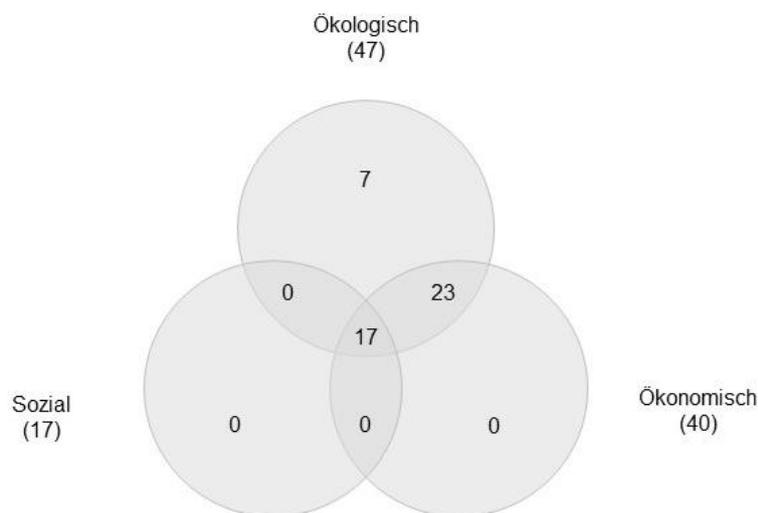


Abbildung 22: Ergebnis Schnittmengen-Modell Nachhaltigkeitsdimensionen

Eine Zusammenfassung der Ergebnisse der thematischen Analyse findet sich in Tabelle 8 die mit Hilfe des in Kapitel 4.1 vorgestellten Kodierungsrahmen erstellt wurde.

| Nr. | D1 | D2 | D3 | M1 | M2 | M3 | P1 | P2 | P3 | A1 | A2 | B1 | B2 | B3 |
|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| 1 | ● | ● | ● | ● | ◐ | ○ | ● | ○ | ○ | ● | ○ | ● | ○ | ◐ |
| 2 | ● | ● | ◐ | ● | ○ | ○ | ● | ○ | ○ | ● | ○ | ○ | ● | ○ |
| 3 | ● | ◐ | ○ | ● | ○ | ○ | ● | ○ | ○ | ● | ○ | ◐ | ● | ◐ |
| 4 | ● | ◐ | ○ | ● | ○ | ○ | ○ | ● | ○ | ● | ○ | ◐ | ● | ○ |
| 5 | ● | ◐ | ○ | ● | ○ | ○ | ● | ○ | ○ | ● | ○ | ● | ○ | ○ |
| 6 | ● | ◐ | ○ | ● | ● | ○ | ● | ○ | ○ | ● | ○ | ○ | ● | ○ |
| 7 | ● | ● | ● | ● | ○ | ○ | ● | ○ | ○ | ● | ○ | ◐ | ● | ◐ |
| 8 | ● | ● | ● | ● | ○ | ○ | ● | ○ | ○ | ● | ○ | ◐ | ○ | ● |
| 9 | ● | ● | ● | ● | ○ | ○ | ● | ○ | ○ | ● | ○ | ● | ● | ○ |
| 10 | ● | ○ | ○ | ● | ○ | ○ | ● | ○ | ○ | ● | ○ | ● | ○ | ● |
| 11 | ● | ● | ● | ● | ◐ | ◐ | ● | ○ | ○ | ● | ○ | ● | ○ | ○ |
| 12 | ● | ● | ● | ● | ○ | ○ | ● | ○ | ○ | ● | ○ | ○ | ○ | ● |
| 13 | ● | ● | ○ | ● | ○ | ○ | ● | ○ | ○ | ● | ○ | ○ | ○ | ● |
| 14 | ● | ● | ○ | ● | ◐ | ○ | ● | ● | ● | ● | ○ | ● | ◐ | ● |
| 15 | ● | ● | ○ | ● | ○ | ○ | ● | ○ | ○ | ● | ○ | ● | ○ | ● |
| 16 | ● | ● | ○ | ● | ○ | ○ | ● | ● | ● | ● | ○ | ● | ○ | ● |
| 17 | ● | ● | ● | ● | ○ | ○ | ● | ○ | ○ | ● | ○ | ● | ○ | ○ |
| 18 | ● | ○ | ○ | ● | ○ | ○ | ○ | ● | ● | ● | ○ | ● | ○ | ● |
| 19 | ● | ○ | ○ | ● | ● | ● | ● | ○ | ○ | ● | ○ | ● | ○ | ◐ |
| 20 | ● | ◐ | ○ | ● | ○ | ○ | ● | ○ | ○ | ● | ○ | ○ | ○ | ● |
| 21 | ● | ◐ | ○ | ● | ● | ● | ○ | ● | ● | ● | ○ | ◐ | ● | ◐ |
| 22 | ● | ◐ | ○ | ● | ○ | ○ | ● | ○ | ○ | ● | ○ | ◐ | ● | ◐ |
| 23 | ● | ◐ | ○ | ● | ○ | ○ | ● | ○ | ○ | ● | ○ | ● | ○ | ○ |
| 24 | ● | ◐ | ◐ | ● | ○ | ○ | ● | ○ | ○ | ● | ○ | ● | ○ | ○ |
| 25 | ● | ◐ | ○ | ● | ○ | ○ | ● | ○ | ○ | ● | ○ | ● | ○ | ○ |
| 26 | ● | ○ | ○ | ● | ● | ● | ● | ○ | ○ | ● | ○ | ● | ○ | ● |
| 27 | ● | ● | ○ | ● | ● | ● | ○ | ● | ○ | ● | ○ | ● | ○ | ◐ |

| | | | | | | | | | | | | | | |
|----|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 28 | ● | ● | ○ | ● | ● | ○ | ● | ● | ○ | ● | ○ | ● | ● | ● |
| 29 | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ○ | ● | ○ | ● | ● | ● |
| 30 | ◐ | ● | ○ | ● | ○ | ● | ● | ○ | ○ | ● | ○ | ● | ○ | ● |
| 31 | ● | ○ | ○ | ● | ○ | ○ | ● | ○ | ○ | ● | ○ | ● | ○ | ● |
| 32 | ● | ○ | ○ | ● | ○ | ○ | ● | ○ | ○ | ● | ○ | ● | ○ | ○ |
| 33 | ● | ○ | ○ | ● | ○ | ○ | ● | ○ | ○ | ● | ○ | ◐ | ● | ○ |
| 34 | ● | ● | ● | ● | ◐ | ○ | ● | ● | ● | ● | ○ | ○ | ● | ○ |
| 35 | ● | ● | ○ | ● | ○ | ○ | ○ | ● | ● | ● | ○ | ● | ◐ | ○ |
| 36 | ● | ● | ○ | ● | ○ | ○ | ● | ○ | ○ | ● | ○ | ○ | ● | ○ |
| 37 | ● | ● | ○ | ● | ◐ | ○ | ● | ● | ● | ○ | ● | ○ | ● | ○ |
| 38 | ● | ● | ○ | ● | ○ | ○ | ● | ● | ● | ○ | ● | ○ | ● | ○ |
| 39 | ● | ● | ● | ● | ● | ◐ | ● | ● | ● | ○ | ● | ● | ● | ● |
| 40 | ● | ● | ● | ● | ● | ◐ | ● | ◐ | ◐ | ○ | ● | ● | ○ | ● |
| 41 | ● | ● | ○ | ● | ● | ◐ | ● | ◐ | ◐ | ○ | ● | ○ | ● | ● |
| 42 | ● | ● | ● | ● | ◐ | ◐ | ● | ○ | ● | ○ | ● | ● | ● | ● |
| 43 | ● | ● | ○ | ● | ◐ | ◐ | ○ | ● | ● | ○ | ● | ○ | ● | ○ |
| 44 | ● | ● | ◐ | ● | ● | ◐ | ● | ● | ● | ○ | ● | ● | ● | ● |
| 45 | ● | ● | ◐ | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ○ | ● | ● | ● | ● |
| 46 | ● | ● | ○ | ● | ◐ | ◐ | ● | ● | ● | ○ | ● | ○ | ● | ○ |
| 47 | ● | ● | ● | ● | ◐ | ◐ | ● | ○ | ○ | ○ | ● | ● | ● | ○ |

● Merkmal ausgeprägt ◐ Merkmal teilweise ausgeprägt ○ Merkmal nicht ausgeprägt

Tabelle 8: Zusammenfassung der Ergebnisse thematische Analyse

4.3.2 Beschreibung der einzelnen Methoden

(1) Value Stream Mapping (VSM)

Die Wertstromanalyse ist eine weit verbreitete Lean Methode, die die Wertschöpfung innerhalb der Organisation, oder entlang einer Wertschöpfungskette untersucht. Aktuell wird VSM zunehmend bei der Analyse der Implementierung von CE-Praktiken eingesetzt, um Abfallquellen und Verschwendung zu identifizieren bzw. Wertströme nach dem Ende des Produktlebenszyklus zu untersuchen. Damit unterstützt das Tool Unternehmen bei der Entwicklung von nachhaltigen Wertversprechen und kann zu einer Sensibilisierung der Kreislaufwirtschaftsthematik innerhalb der Unternehmen beitragen. In den Werken von Bocken et al. (2013), Hedlund et al. (2020), Hernandez Marquina et al. (2021) und Howard et al. (2022) wird die Anwendung von VSM zur Verbesserung von zirkulären Systemen untersucht (Bocken et al., 2013; Hedlund et al., 2020; Hernandez Marquina et al., 2021; Howard et al., 2022). Eine Kombination der Wertstromanalyse mit anderen CM Methoden ist ebenfalls möglich. So verbinden Abideen und Mohamad (2019) VSM und der Discrete Event Simulation oder Lee et al. (2021) weisen darauf hin, dass auch eine Verbindung mit Analysemethoden, wie die Material Flow Analysis oder die LCA möglich ist (Abideen and Mohamad, 2020; J. K. Y. Lee et al., 2021).

(2) TRIZ Methode

Ein großer Teil der globalen Umweltbelastungen entsteht durch die Gewinnung, Verarbeitung und Entsorgung von Primärressourcen. Das Produktdesign nimmt hierbei eine essenzielle Rolle ein, da die Qualität und Quantität der verwendeten Ressourcen, sowohl in der Pre-Use Phase während der Herstellung, in der Use-Phase bei der Nutzung, als auch Post-Use bei der Entsorgung Einfluss nehmen (Desing et al., 2021).

Die TRIZ Methode ist ein Zusammenspiel aus verschiedenen methodischen Werkzeugen, die es ermöglicht, ausgehend von einer Zielbeschreibung ein spezifisches technisches Problem zu definieren und analysieren. Um eine Lösung für die abstrakte Problemstellung zu finden, erfolgt eine kreative Übersetzung des Problems in mögliche Lösungsvorschläge. Aus dieser Menge an Vorschlägen wird eine finale Lösung ausgewählt (VDI 4521, 2021). Spreafico und Landi (2022) verwenden diese Methode, um innovative Design-Ideen zur nachhaltigen Produktgestaltung zu gewinnen (Spreafico and Landi, 2022).

(3) Resource Pressure Methode

Im Paper von Desing et al. (2021) wird die sogenannte Ressourcendruck Methode, engl. Resource Pressure Method, vorgestellt, welche eine einfache quantitative Bewertung von Designentscheidungen hinsichtlich Ressourcenauswahl, sowie eine

qualitative Leitlinie bei der Entwurfskonzeption bietet und damit eine klare Orientierungsrichtung während der Designphase vorgibt. Am Beispiel eines Wärmetauschers wird gezeigt, dass die Ressourcendruck Methode zu einer Reduktion der Gesamtumweltbelastung führen kann (Desing et al., 2021).

(4) Remanufacturing Information Feedback Framework (RIFF)

Remanufacturing ist ein CE Strategie, bei der Teile aus defekten Produkten in einen neuwertigen oder besseren Zustand versetzt werden, die die gleiche Funktion erfüllen (BMK, 2021). Damit können die Umweltauswirkungen von Produkten während ihres Lebenszyklus verringert werden. Um die Wiederaufbereitung zukünftiger Produkte zu erleichtern, bedarf es einer Rückkopplung zwischen Remanufacturing und Design. Die Informationsfeedback Methode von Lindkvist Haziri und Sundin (2020) schafft hierbei Abhilfe, und soll Fertigungsunternehmen dabei unterstützen, den Wiederaufbereitungsprozess von Produkten durch eine Verbesserung des Produktdesigns zu optimieren (Lindkvist Haziri and Sundin, 2020).

(5) Modular Design Support System

Die Autoren Stavropoulos et al. (2019) stellen ein modulares Design Unterstützungssystem vor, das dem Benutzer Variablen und Szenarien für die Montage bzw. Demontage liefert, die in Kombination mit den Chancen der Wiederverwendbarkeit, eine Entscheidungsunterstützung während des Designprozesses bietet (Stavropoulos et al., 2019).

Auch innerhalb der Forschungsarbeit „A methodological approach to design products for multiple lifecycles in the context of circular manufacturing systems“ wird ein solcher methodischer Ansatz präsentiert, der den Design-Prozess von Produkten mit mehreren Lebenszyklen unterstützt. Damit soll sichergestellt werden, dass die Produkte, Komponenten bzw. Materialien zu jeder Zeit den höchsten Nutzen und Wert behalten. Anhand eines Fallbeispiels wird die Anwendbarkeit und Effektivität des Ansatzes demonstriert (Asif et al., 2021).

(6) Engineering Design Method

Auf Basis der Analyse und des Entwurfs von Lebenszyklus-Szenarien von Produkten, wird in der Publikation von Evrard et al. (2021) eine Entwurfsmethode vorgestellt, welches eine umweltfreundliche Gestaltung von Unternehmen, Produkten und Dienstleistungen und die Bewertung ihrer Umweltwerte ermöglicht. Diese neue Art der Konzeptionierung wird durch gängige Engineering-Tools, wie beispielsweise die „Failure Modes Effect und Criticality Analysis“ (FMECA), unterstützt und kann auch in klein- und mittelständischen Unternehmen (KMUs) eingesetzt werden (Evrard et al., 2021).

(7) Eco-Design

Eco-Design ermöglicht eine Verbesserung der Umweltsleistungen eines Produktes während seines Lebenszyklus, da es die Integration von Umweltaspekten in das Produktdesign impliziert (Margallo et al., 2021). Dass sich die Anwendung von Eco-Design positiv auswirkt, zeigt beispielsweise das Paper von Mieltunen und Santasalo-Aarnio (2021), die die Auswirkungen der Methode auf das Recycling von Farbstoffsolarzellen untersuchen (Mieltunen and Santasalo-Aarnio, 2021).

In der analysierten Literatur wird Eco-Design häufig in Kombination mit andern CM Methoden verwendet. So konnten die Autoren Margallo et al. (2021) durch Integration von LCA und Eco-Design eine Methode entwickeln, die es ermöglicht Umweltauswirkungen zu analysieren und Verbesserungsstrategien auf Grundlage der Eco-Design Prinzipien anzuwenden. Dabei werden sowohl technische, ökologische, ökonomische, als auch soziale Aspekte berücksichtigt (Margallo et al., 2021).

Auch die Autoren Martínez-Cámara et al. (2021) stellen in ihrem Werk eine Eco+LCA Methode vor, die es den Designern ermöglichen soll, die Umweltauswirkungen ihrer Designentscheidungen zu visualisieren (Martínez-Cámara et al., 2021b).

In der Publikation von Vacchi et al. (2021) werden Industrie 4.0 Technologien, Smart Data, LCA und Techniken zur Analyse der Mikrostruktur von Materialien kombiniert, um ein zirkuläres Eco-Design Modell zu entwickeln. Das vorgestellte Modell wurde zunächst innerhalb einer Simulationsumgebung getestet und anschließend in einer Pilotumgebung validiert (Vacchi et al., 2021).

(8) Concept Circularity Evaluation Tool (CCET)

Zur Unterstützung des Bewertungsprozesses alternativer Produktkonzepte in Hinblick auf ihr Kreislauffähigkeitspotenzial wird von Albæk et al. (2020) das Konzept zur Bewertung der Kreislauffähigkeit, engl. Concept Circularity Evaluation Tool (CCET), vorgestellt. Das Tool ist bereits in den frühen Phasen des Produktdesign und der Produktentwicklung anwendbar und wurde in enger Zusammenarbeit mit Fertigungsunternehmen entwickelt (Kamp Albæk et al., 2020).

(9) Circular Product Design

Aktuell folgen die meisten Produkte und Komponenten, die derzeit in den Kreislauf zurückgeführt werden, einem zirkularitätsfernen Design. Deshalb stellen Shahbazi und Jönbrink (2020) Leitlinien vor, welche Initiativen der Unternehmen zur Gestaltung zirkulärer Produkte in den frühen Phasen des Produktdesigns und Produktentwicklung aufgreifen. Damit kann der Entscheidungsfindungsprozess unterstützt werden und es wird zur Verbesserung der Kreislauffähigkeit von Produkten beitragen. Eine Validierung der Leitlinien findet anhand von vier Unternehmen in den nordischen

Ländern statt (Shahbazi and Jönbrink, 2020). Howard et al. (2022) greifen die Methode des zirkulären Produktdesign ebenfalls auf und setzen diese als Instrument zur Einführung zirkulärer Wertschöpfung in KMUs ein (Howard et al., 2022).

(10) Recyclability Assessment Method

Recycling ist nicht nur Teil der Abfallwirtschaft, sondern eng mit vorhergehenden Produktionsstufen, wie dem Produktdesign und der Herstellung verbunden. Wie sich zeigt, ist das Recyclingergebnis erheblich von dem Input innerhalb des Recyclingprozess abhängig, wobei sich mit steigender Komplexität der Produkte der Recyclingaufwand erhöht. Um Transparenz über die Auswirkungen des Produktdesign auf das Recyclingergebnis zu schaffen ist die Bewertung der Recyclingfähigkeit von Produkten essenziell. Da in derzeitigen Methoden zur Bewertung der Recyclingfähigkeit Aspekte des Produktdesign nicht berücksichtigt werden, stellen Roithner et al. (2021) eine weiterentwickelte Bewertungsmethode vor. Die „Recyclability Assessment“ Methode ermöglicht eine Bewertung der Recyclingfähigkeit von Produkten in der Entwurfsphase und hilft Schwachstellen im Produktdesign zu identifizieren.

(11) Orientation Events

Wissensaustausch innerhalb aber auch außerhalb der Unternehmen trägt essenziell dazu bei, die Einführung zirkulärer Wertschöpfung zu befähigen, indem die Beteiligten Akteure von den Erkenntnissen erfahrenerer Beteiligten profitieren. Ein solcher Wissenstransfer kann beispielsweise zufolge Howard et al. (2022) innerhalb von Orientierungsevents stattfinden (Howard et al., 2022).

(12) General Morphologic Analysis (GMA)

General Morphologic Analysis (GMA) ist eine Methode, die es ermöglicht multidimensionale, komplexe Probleme zu identifizieren und zu untersuchen. Sie wird in unterschiedlichen Managementbereichen eingesetzt, z.B. in der strategischen Planung, Szenarienbildung, dem Design Thinking oder in Entscheidungsprozessen. Beim Übergang zur Kreislaufwirtschaft können Unternehmen mit Hilfe dieser Methode verschiedene Business-Szenarien untersuchen, auf Basis dessen neue Wertversprechen definieren und kohärente strategische Entscheidungen treffen. Damit kann die Einführung zirkulärer Wertschöpfung befähigt werden (Franco et al., 2021).

Franco et al. (2021) entwickeln ein strategisches Framework, dass die GMA mit der MCDM Methode kombiniert, und beim Übergang zu CE zur Überwachung und Bewertung der zirkulären Performance in Organisationen eingesetzt werden kann (Franco et al., 2021).

(13) Circularity Measurement Toolkit

Bei der Einführung des CE-Konzepts spielt auch die Bewertung des Kreislaufwirtschaftsgrades eine wichtige Rolle. Deshalb wird im Paper „A circularity measurement toolkit for manufacturing SMEs“ ein Circularity Measurement Toolkit (CMT) in Form eines Fragebogens vorgeschlagen, das den Grad der Zirkularität von KMUs bewertet. Ziel ist es notwendige Korrekturmaßnahmen zu identifizieren bzw. Strategie zu entwickeln, welche die negativen Umweltauswirkungen reduzieren, bei gleichzeitiger Erzielung wirtschaftlicher Vorteile (Garza-Reyes et al., 2019).

(14) Multi-Criteria Decision Making (MCDM): Nr. 45, 61.44, 55, 52

Multi-Criteria Decision (MCD) Probleme sind Probleme mit einer begrenzten Anzahl an Alternativen, aber widersprüchlichen Kriterien. Multi-Criteria Decision Making (MCDM) Methoden werden eingesetzt, um in solchen Szenarien strategische Entscheidung treffen zu können. Das Vorgehen zur Lösung eines solchen Problems kann gemäß Musingwini (2010) und Mahase et al. (2016) wie folgt eingeteilt werden: 1. Identifikation der Ziele und Kriterien, 2. Zuweisung von Gewichtungen mittels numerischer Werte für die identifizierten Kriterien, 3. Reihung der Alternativen und Entscheidungsfindung auf Grundlage des Ergebnisses. Zu den am weitest verbreiteten MCDM Methoden gehören unter anderem die Multi-Attribute Utility Theory (MAUT), Goal Programming, Analytic Hierarchy Process (AHP), Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS) (Daniyan et al., 2021).

Die Rückführlogistik, engl. Reverse Logistic (RL), ist eng mit der Wiederaufbereitung von Produkten bzw. Komponenten verbunden, und ein mögliches Anwendungsgebiet der MCDM-Methode. So präsentieren die Autoren Zhang et al. (2021) eine Multi-Criteria Decision Making Methode, um den besten RL-Anbieter für die Wiederaufbereitung auszuwählen (Zhang et al., 2021).

Dagegen verwendet Daniyan et al. die MCDM Methode, konkret ein AHP Decision Model, für die Auswahl des am besten geeigneten Materials und Montageverfahrens bei der Entwicklung und Wartung des Wagenkastens eines Triebfahrzeugs (Daniyan et al., 2021).

Von Lee et al. (2020) wird ein Modell zur Auswahl von Altreifen-Recyclingbetrieben vorgestellt, das auf einer Fuzzy AHP-TOPSIS Methode beruht (S. Y. Lee et al., 2021).

Zur Unterstützung von strategischen Planungsaufgaben während der Einführung von Manufacturing-Remanufacturing Closed-Loop Systemen schlagen die Autoren der Publikation „Hybrid decision-making and optimisation framework for manufacturing-remanufacturing closed loop systems“ ein Entscheidungsfindungs-Framework vor. Im qualitativen Teil wird dabei auf die AHP Methode zur Konfiguration des Closed-Loop Netzwerks zurückgegriffen, während der quantitative Teil auf einem

Optimierungsmodell zur Technologieimplementierung beruht (Bagalagel and ElMaraghy, 2021).

Im Paper „Coupling material circularity indicators and life cycle based indicators: A proposal to advance the assessment of circular economy strategies at the product level“ wird eine Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA) entwickelt, welche die Debatte über die Identifizierung der am besten geeigneten Metriken für die Einführung zirkulärer Wertschöpfung schließen soll. Durch die Kopplung von Materialkreislaufindikatoren mit LCA-Indikatoren wird ein Rahmen geschaffen, der die Bewertung von CE-Strategien auf Produktebene ermöglicht (Niero and Kalbar, 2019).

(15) Multi-Group Decision-Making Technique

In der Studie von Kamble et al. wird eine Multi-Group Decision Making Technik entwickelt, um Big-Data basierte CE Praktiken in der Automobilindustrie zu identifizieren und zu bewerten (Kamble et al., 2021).

(16) Decision Making Support Tools

Das Paper „An approach to Evaluate the Impact of the Introduction of a Disassembly Line in Traditional Manufacturing Systems“ liefert ein Ansatz zur Bewertung der Zweckmäßigkeit der Investition in eine Demontagelinie. Damit wird die Möglichkeit geboten, die wirtschaftliche Rentabilität und die Umweltvorteile einer manuellen Demontagelinie für EOL-Produkte in einem traditionellen Produktionssystem zu bewerten, um den Entscheidungsprozess von Fertigungsunternehmen zu unterstützen (Sergio et al., 2022).

Die Wiederaufbereitung von defekten Ersatzteilen bedarf eines Rückführsystems. Für die Planung, Organisation und Prognostik der Rücklieferung defekter Ersatzteile, präsentieren Makarova et al. (2018) ein Entscheidungsunterstützungstool. Damit wird das übergeordnete Ziel verfolgt, Leerfahrten beim Rücktransport defekter Ersatzteile zu minimieren (Makarova et al., 2018b).

(17) Circularity Indicator Tool

In der Arbeit von Trollman et al. (2021) wird ein Circularity Indicator Tool zur Messung der ökologischen Einbettung von Produktionen entwickelt und validiert (Trollman et al., 2021).

(18) Environmental Performance Indicator

Die Verlängerung der Lebensdauer von Produkten führt zu einer Reduktion seiner Umweltbelastung. Obwohl diese Hypothese schlüssig erscheint, ist es nicht zwangsläufig für alle Produkte zutreffend. So kann ein Produkt, dass während seiner Lebensdauer erhebliche Umweltauswirkungen verursacht dessen Nutzungsdauer

jedoch verlängert wird, zu einer höheren Umweltbelastung führen, als wenn es vor Erreichen seines EOL durch eine weiterentwickelte Alternative ersetzt wird. Im Paper „When to replace products with which (circular) strategy? An optimization approach and lifespan indicator“ wird deshalb eine Methode auf Basis des „Environmental Performance Indicator“ vorgeschlagen, um den optimalen Austauschzeitpunkt zu finden, an dem die Umweltauswirkungen minimal sind. Man spricht hier auch von der Optimalen Umweltlebensdauer, engl. Optimal Environmental Lifetime (OEL) (Hummen and Desing, 2021).

(19) Ecological Rucksack

Der ökologische Rucksack ist eine sinnbildliche Darstellung des Ressourcenverbrauchs eines Produkts oder einer Dienstleistung, die während der Pre-Use, Use und Post-Use Phase entstehen. Damit wird ein Vergleichsmaßstab geboten, welche die Folgen der Bereitstellung bestimmter Güter aufweist. Doazhong et al. (2021) nutzen in ihrer Arbeit diesen Vergleichsmaßstab (Daozhong et al., 2011).

(20) Package-to-Product Indicator

Verpackungen sind fester Bestandteil der meisten Lebensmittel und Getränke und für eine große Menge an entstehenden Abfall verantwortlich. Ziel der Studie „Proposal of package-to-product indicator for carbon footprint assessment with focus on the Czech Republic“ war es eine Möglichkeit zu finden, die Umweltauswirkungen von Verpackungsmaterialien zu überwachen. Dazu wurde der Package-to-Product (PtP) Indikator vorgestellt, der die Bewertung der Umweltauswirkungen von Verpackungen ermöglicht und damit zu einer Reduktion dieser beiträgt (Šerešová and Kočí, 2020).

(21) Digital Passport

Um die Rückverfolgung von wiederverwendbaren Verpackungen zu erleichtern, entwickeln Ellsworth-Krebs et al. (2021) einen digitalen Pass. Dieser soll mit der obligatorischen Berichterstattung die Möglichkeit bieten, die Wiederverwendbarkeit von Verpackungsmaterialien zu prüfen und Anreize schaffen Verpackungen mehrfach zu verwenden (Ellsworth-Krebs et al., 2022).

(22) Embodied Energy Analysis

Die Quantifizierung des Energieverbrauchen bei Bearbeitungsprozessen ist für die Reduktion der Umweltauswirkungen unerlässlich. Deshalb wird von Liu et al. (2017) mit Hilfe der Embodied Energy Analysing der Gesamtenergieverbrauch von Hartfräsen untersucht (Liu et al., 2017).

(23) Failure Mode And Effect Analysis (FMEA)

Kimita et al. (2020) stellen eine Fehleranalysemethode zur Förderung der Kreislaufwirtschaft vor, die in der frühen Entwurfsphase dazu verwendet werden kann, Fehlermodi zu identifizieren und Gegenmaßnahmen zu entwickeln und damit die Ressourceneffizienz zu steigern (Kimita et al., 2021).

(24) Trade-Off Analysis

In der Arbeit von Kravchenko et al. (2021) wird ein Rahmenwerk vorgeschlagen, das die Analyse von Zielkonflikten in frühen Phasen der Entwicklung von nachhaltigkeitsorientierten Initiativen unterstützt (Kravchenko et al., 2020).

(25) Life Cycle Gap Analysis

Da der herkömmliche Cradle-to-Grave Ansatz für die sinnvolle Interpretation von LCA Studien im Sinne der Kreislaufwirtschaft nicht vollständig geeignet ist, präsentieren Dieterle et al. (2018) die Life Cycle Gap Analyse. Diese soll als Entscheidungshilfe innerhalb der Ökobilanz fungieren und zeigt die theoretischen Kreislaufücken in Bezug auf potenzielle Umweltauswirkungen während des Lebenszyklus eines Produktes auf (Dieterle et al., 2018).

(26) Material Flow Analysis

Die Materialflussrechnung (MFA) oder auch Stoffstromanalyse (SFA) ist eine analytische Methode, die eingesetzt wird, um Material- bzw. Stoffströme zu quantifizieren. Zuzufolge Kalmykova et al. (2018) ermöglicht die Erfassung von Materialströmen, eine Überwachung der Veränderung über die Zeit und damit eine Analyse der Effizienz von CE-Programmen. Ein Beispiel dafür, wie eine solche Analysemethode praktisch angewendet werden kann, ist im Paper „Growth in global materials use, GDP and population during the 20th century“ zu finden (Kalmykova et al., 2018; Krausmann et al., 2009).

(27) Waste Input-Output (WIO) Analysis

Ganz allgemein ist die Input-Output Analyse ein Verfahren das zur mikroökonomischen Analyse von volkswirtschaftlichen Zusammenhängen dient. Durch eine Erweiterung der Methodologie um Nachhaltigkeitskomponenten können damit auch ökologische Aspekte adressiert werden. Auf Basis des Leontief-Duchin „Environmental Input-Output“ (EIO) entwickelten Nakamaru und Kondo (2018) das dynamische Abfall Input-Output (dWIO) Modell, das sich mit Qualitätsproblemen des Recyclings befasst, die durch unbeabsichtigtes Mischen in der Recyclingphase entstehen (Nakamura and Kondo, 2018).

(28) Maturity Model

Mit der zunehmenden Bedeutung des Kreislaufwirtschaftskonzept bedarf es einer Methode zur Bewertung der CE-bezogenen Aspekte von Unternehmen. Das Reifegradmodell soll hierbei Abhilfe schaffen. So präsentieren Sacco et al. (2021) das „Circularity and Maturity Firm-Level Assessment Tool (CM-FLAT) zur Bewertung des Reifegrads und Kreislauffähigkeit von KMUs. Golinska-Dawson et al. (2021) beschäftigen sich in ihrer Arbeit ebenfalls mit einem Reifegradmodell. Sie entwickeln damit ein Verfahren zur Priorisierung von Maßnahmen, die einer Umsetzung bedürfen, um den verantwortungsvollen Umgang mit Ressourcen innerhalb eines Remanufacturing Unternehmens zu befähigen. Die Methode soll dabei unterstützen Reifegradlücken und Verbesserungspotentiale aufzuweisen und wurde in KMUs getestet (Golinska-Dawson et al., 2021; Sacco et al., 2021).

(29) Life Cycle Assessment (LCA)

Life Cycle Assessment (LCA), oder Deutsch Ökobilanz bzw. Lebenszyklusanalyse, ist eine international genormte Methode, um die Umweltverträglichkeit eines Produkts über seinen gesamten Lebenszyklus zu bewerten. Allgemein kann die Methode gemäß ISO 14040 in vier Schritte eingeteilt werden. Zunächst erfolgt die Definition des Ziels und Untersuchungsrahmen, indem die technologischen Grenzen des Produktsystems festgelegt werden. In der darauffolgenden Sachbilanz erfolgt eine Quantifizierung des Input und Output des Produktsystems. Anschließend werden in der Phase der Wirkungsabschätzung Methoden der Ökobilanzierung verwendet, um alle In- und Outputs in globale, regionale und lokale Umweltauswirkungen umzurechnen. In der letzten Phase, der Auswertung, findet die systematische Überprüfung der Ergebnisse in Hinblick auf das zuvor definierte Ziel, die Auswertung und Kommunikation der Ergebnisse statt (Howard et al., 2022).

LCA ist vielseitig anwendbar und wird in der ermittelten Literatur beispielsweise in Forschungsbereichen wie Abfallwirtschaft (Hidalgo-Crespo et al., 2022; Lozano-Miralles et al., 2019; Moretti et al., 2021; Rigamonti et al., 2017; Schulte et al., 2021), Verpackung (Morgan et al., 2022), Circular Business Models (Bjørnbet et al., 2021), Ressourceneffizienz (Díaz-Ramírez et al., 2020; Du et al., 2015; Tóth Szita, 2017), Umweltverschmutzung (Rebitzer et al., 2004) und Abwasseraufbereitung (Dominguez et al., 2018) eingesetzt, um eine nachhaltigkeitsorientierte Entscheidungsfindung zu ermöglichen.

Oftmals findet eine Kombination der Ökobilanz mit anderen CM Methoden und Ansätzen statt, so verbinden Abbate et al. (2022), Díaz-Ramírez et al. (2020) und Gouveia et al. (2022) LCA mit LCC, García-Muina et al. (2021) mit Industrie 4.0 Technologien, Niero und Kalbar (2019) mit MCDM, Scheepens et al. (2016) und Chen und Huang (2019) mit PSS und Martínez-Cámara et al. (2021) mit Eco-Design (Abbate

et al., 2022; Chen and Huang, 2019; Díaz-Ramírez et al., 2020; García-Muiña et al., 2021; Gouveia et al., 2022; Martínez-Cámara et al., 2021b; Niero and Kalbar, 2019; Scheepens et al., 2016).

(30) Life Cycle Costing (LCC)

Life Cycle Costing (LCC) bzw. Lebenszykluskostenrechnung ist eine Methode zur Erfassung und Analyse der Kosten eines Produktes über dessen gesamten Lebenszyklus. Im Sinne der Kreislaufwirtschaft wird die Methode dazu verwendet, den wirtschaftlichen Gegenwert von Umweltschäden zu bestimmen. Damit beschränkt sich das klassische Anwendungsfeld dieses wirtschaftlichen Bewertungsinstrument primär auf die ökonomische Nachhaltigkeitsdimension (Medina-Salgado et al., 2021).

Konventionelles LCC wird beispielsweise dafür eingesetzt, Ingenieure und Entwickler mit Hilfe der bereitgestellten Kosteninformationen beim Produktdesign zu unterstützen. Beispiele hierfür sind die Werke von Asiedu und Hu (1998) und Bengtsson und Kurdve (2016) (Asiedu and Gu, 1998; Bengtsson and Kurdve, 2016).

Aktuelle Forschungsvorhaben setzten sich damit auseinander LCC, um die ökologische Dimension zu erweitern. Ein Beispiel für eine solche Weiterentwicklung der LCC bietet die Autoren Medina-Salgado et al. (2021), die die Lebenszykluskostenrechnung, um Kreislaufwirtschaftsparameter erweitern (Medina-Salgado et al., 2021).

Wie bereits erläutert wird die Methode der Lebenszyklusrechnung in der Literatur auch in Verbindung mit LCA angewendet. So wird in den Werken „Life Cycle Assessment and Cost Analysis of Additive Manufacturing Repair Processes in the Mold Industry“, „Battery Manufacturing Resource Assessment to Minimise Component Production Environmental Impacts“ und „Environmental and Economic Assessment of Repairable Carbon-Fiber-Reinforced Polymers in Circular Economy Perspective“ eine Kombination von LCC und LCA vorgestellt (Abbate et al., 2022; Díaz-Ramírez et al., 2020; Gouveia et al., 2022)

(31) Self-Assessment Readiness Tool (MATChE)

Die Autoren Pigozzo und McAlloone (2021) präsentieren eine webbasierte Plattform namens MATChE (Making the Transition to a Circular Economy), die Fertigungsunternehmen dabei unterstützen soll, ihre Bereitschaft für den CE-Übergang selbstständig einzuschätzen. Dabei werden nicht nur Stärken und Schwächen bei der CE-Implementierung aufgewiesen, sondern zudem die Entwicklung von Transformationswegen befähigt (Pigozzo and McAlloone, 2021).

(32) Change Readiness Measurement Tool

Thorley et al. (2022) entwickeln ein Modell zur Messung der Veränderungsbereitschaft von KMUs zur Einführung zirkulärer Wertschöpfung (Thorley et al., 2022).

(33) Design Navigator

In dem Werk von Neramballi et al. (2020) wird ein Designnavigator namens „Lifecycle-oriented Function Deployment“ (LFD) vorgestellt, um den Umwandlungsprozess von klassischen Geschäftsmodellen hin zu PSS zu unterstützen. Das entwickelte Tool beruht dabei auf einer Kombination der Lebenszyklusanalyse (LCA) und dem sogenannten „Quality Function Deployment“ (QFD) (Neramballi et al., 2020).

(34) Product Service System (PSS)

Product Service Systems (PSS) ist eine dematerialisierte Lösung für die Präferenzen und Bedürfnisse der Verbraucher, das aus einer Kombination aus Produkten, Dienstleistungen, unterstützenden Netzwerken und Infrastrukturen besteht. Damit wird ein Übergang von dem klassischen Produkt fokussierten, zum dienstleistungsorientierten Geschäftsmodell ermöglicht (Neramballi et al., 2020).

Autoren wie Kühl et al. (2022) und Haber und Fargnoli (2021) greifen diesen Ansatz auf. Kühl et al. untersucht dabei den Zusammenhang zwischen PSS mit Circular-Supply-Chain (CSC) Praktiken. Die Ergebnisse der Studie zeigen, dass produkt-, nutzen- und ergebnisorientierte PSS positive Auswirkungen auf die Verlangsamung, Verengung und Schließung von Ressourcenkreisläufen haben kann (Haber and Fargnoli, 2021; Kühl et al., 2022).

Die Autoren Azarenko et al. stellen ein technisches Product Service System (t-PSS) für die Werkzeugmaschinenindustrie vor, mit dem, durch die Integration von Produkt- und Dienstleistungsangebot, einen hohen Nutzwert geboten werden kann (Azarenko et al., 2009).

Im Paper „Application review of LCA (life cycle assessment) in circular economy: from the perspective of PSS (product service system)“ wird der PSS Ansatz mit der Methode des Life Cycle Assessment (LCA) kombiniert (Chen and Huang, 2019).

Eine Kombination von Product Service System mit weiteren CE-Praktiken findet ebenfalls in der Arbeit von Zheng et al. (2019) statt, der die Anwendung von Smart PSS untersucht. (Zheng et al., 2019)

(35) Adaptive Disassembly Planer

Derzeit wird die Demontage von Elektrofahrzeugbatterien (EVBs) primär manuell durchgeführt. Die manuelle Demontage stellt nicht nur ein Sicherheitsrisiko dar, sondern wird in den nächsten Jahren vermehrt zu Engpässen innerhalb der Produktion

führen, da eine hohe Rücklaufmenge prognostiziert wird. Die automatisierte Demontage wird daher als Schlüssel zu einer hocheffizienten Kreislaufwirtschaft betrachtet. Aufgrund dessen wird im Paper „Optimization of Disassembly Strategies for Electric Vehicle Batteries“ ein adaptiver Demontageplaner mit einem integrierten Optimierungstool für Demontagestrategien entwickelt, um einen sicheren, wirtschaftlichen und ökologischen Demontageprozess zu gewährleisten (Baazouzi et al., 2021).

(36) Multi-Level Demand-Response Model

Im Werk von Ma et al. (2020) wird ein Framework für eine datengesteuerte, nachhaltige, intelligente Fertigung auf der Grundlage eines mehrstufigen „Demand Response“ (DR) Modell für die energieintensive Industrie vorgestellt. Mit Hilfe dieses Modells wird es möglich, den Produktionsplan entsprechend der Strompreise zu optimieren und damit die Energieeffizienz des Produktionsprozess zu verbessern (Ma et al., 2020).

(37) Programs & Algorithms

In der Literatur haben sich vereinzelt Programme und Algorithmen durchgesetzt, um unterschiedlichste Problemstellungen bei der Einführung zirkulärer Wertschöpfung zu adressieren. Jayakumar et al. (2019) verwendet zum Beispiel ein Mixed-Integer Programming Model zur Integration von Sharing-Netzwerken in ein zirkuläres Produktionssystem. Rentizelas et al. (2020) verwenden die selbe Technologie, um das Rückführ Supply Chain Netzwerk für die Rotorblätter von Windrädern zu verbessern (Jayakumar et al., 2020; Rentizelas et al., 2022). Für die Bewertung der Reparatur- und Wiederbeschaffungskosten bei Ausfällen von Leiterplatten entwickeln Karagiannopoulos et al. (2022) einen Integer Linear Programming (ILP) Algorithmus (Karagiannopoulos et al., 2021). Im Paper von Yin et al. (2021) und Lee et al. (2015) wird ein genetischer Algorithmus für die Minimierung der Gesamtkosten und der Lieferverzögerung in der Rückführlogistik (Lee et al., 2015) bzw. der Produktionsspanne in der zirkulären Produktion von Gummiprodukten (Yin et al., 2021) herangezogen.

(38) Additive Manufacturing (AM)

Die additive Fertigung, engl. Additive Manufacturing (AM), hat sich zu einer Produktionsstrategie für die Entwicklung hochwertiger Produkte mit komplexem Design und kundenspezifischen Merkmalen etabliert. Im Gegensatz zu subtraktiven Fertigungsverfahren wird beim AM zur Herstellung von dreidimensionalen Objekten, Material schichtweise Material aufgetragen. Mit der Reduktion des Energie- und Materialverbrauchs, was wiederum eine Verringerung des Abfallaufkommens impliziert, können nicht Produktionskosten gesenkt werden, sondern zudem zu einer Steigerung der Energie- und Ressourceneffizienz beitragen werden. Durch die

Realisierung komplexer, widerstandfähigerer Geometrien kann zudem der Produktlebenszyklus verlängert werden (Gouveia et al., 2022; Laskurain-Iturbe et al., 2021).

In den Werken von Laskurain-Iturbe et al. (2021), Romani et al. (2021), Ferreira et al. (2020), Turner et al. (2019), Enyoghasi und Badurdeen (2021), Nascimento et al. (2018), und Stock und Seliger (2016) wird AM als Technologie zur Einführung zirkulärer Fertigung herangezogen (Enyoghasi and Badurdeen, 2021; Ferreira et al., 2020; Laskurain-Iturbe et al., 2021; Nascimento et al., 2018; Romani et al., 2021; Stock and Seliger, 2016; Turner et al., 2019).

Bei der Reparatur und Wiederaufbereitung von Bauteilen kann die additive Fertigung zudem verwendet werden, um den Reparaturprozess zu automatisieren und zu verbessern. Autoren wie Rahito et al. (2019) und Saboori et al. (2019) leisten einen Beitrag zu diesen Forschungsbereich und zeigen wie AM den Repair und Remanufacturing Prozess unterstützen kann (Rahito et al., 2019; Saboori et al., 2019).

(39) Artificial Intelligence (AI)

Künstliche Intelligenz (KI), engl. Artificial Intelligence (AI), nutzt eine Mischung aus Wahrscheinlichkeit und Statistik, Mathematik und neuronale Netze, um vielfältige Problemstellungen zu behandeln. Mit ihrer Fähigkeit, komplexe Aufgaben in einfache Entscheidungen zu zerlegen, bietet KI ein hohes Potential für die Anwendung in zirkulären Systemen (Schlüter et al., 2021). Die Forschungsaktivitäten in diesem Bereich erstrecken sich über Anwendungsfelder wie die Bild- und Sprachverarbeitung, Robotik, maschinelles Lernen, oder neuronale Netzwerke (Laskurain-Iturbe et al., 2021; Noman et al., 2022).

Durch den Einsatz Künstlicher Intelligenz kann der Material- und Energieverbrauch innerhalb der Produktion gesenkt werden. Anwendungsbeispiele dafür sind die Prozessoptimierung (Laskurain-Iturbe et al., 2021), eine automatisch an die Außentemperatur angepasste Regelung der Klimageräte in den Produktionsstätten (Laskurain-Iturbe et al., 2021), die Einführung von Nachhaltigkeitsaspekten im Supply Chain Management unter Verwendung maschinellen Lernens (ML) (Wang and Zhang, 2020) oder die Steigerung der Energieeffizienz durch Abwärme Rückgewinnung unterstützt durch ML (Khayyam et al., 2021).

Neben der Steigerung der Ressourceneffizienz kann mit Hilfe der KI ein direkter Beitrag zu Umsetzung diverser CE-Strategien geleistet werden. So setzten Nowakowski et al. (2019) AI zur nachhaltigen Sammlung von Elektroabfällen ein, Wilts et al. (2021) verwendet Künstliche Intelligenz zur Abfallsortierung oder Schlüter et al. (2021) verwenden Künstliche Intelligenz, konkret maschinelle Bildverarbeitung, zur Identifikation, Inspektion und Sortierung für die Reverse Logistic beim Remanufacturing (Nowakowski et al., 2020; Schlüter et al., 2021; Wilts et al., 2021). In

der Arbeit von Nañez Alonso et al. (2021) wird ein neuronales Netzwerk zur automatischen Bilderkennung eingesetzt, um den Recyclingprozess zu optimieren (Nañez Alonso et al., 2021). Deng et al. (2020) entwickeln ein Modell zur wirtschaftlichen Realisierbarkeit von Produktrecycling durch die Integration von maschinellen Lernen und dem Sherwood-Prinzip und Ajwani-Ramchandani et al. versuchen mit Hilfe AI das Konzept der Kreislaufwirtschaft für Verpackungsabfälle einzuführen (Ajwani-Ramchandani et al., 2021; Deng et al., 2021)

(40) Big Data and Advanced Analysis

Unter den Begriff „Big Data“ versteht man Datensätze, die aufgrund ihrer Größe, Komplexität und Schnelllebigkeit schwer zu verarbeiten sind. Big Data Analysen wird im klassischen Sinne dafür eingesetzt große Datensätze zu untersuchen, um Informationen (Markttrends, Korrelationen, Kundenpräferenzen etc.) aufzudecken, die Unternehmen dabei unterstützen, fundierte Geschäftsentscheidungen treffen zu können (Laskurain-Iturbe et al., 2021).

Aus Sicht der Kreislaufwirtschaft kann die Big Data Analyse unter anderem dazu beitragen, die Flexibilität der Produktion und die Produktqualität zu verbessern, sowie die Ressourcennutzung, im Speziellen Energie, Rohstoffe und Wasser zu optimieren oder die Einführung von PSS voranzutreiben (Blunck and Werthmann, 2017; Bressanelli et al., 2018b, 2018a; Enyoghasi and Badurdeen, 2021; Laskurain-Iturbe et al., 2021; Nascimento et al., 2018; Pham et al., 2019; Song and Moon, 2017).

(41) Blockchain

Die Blockchain gewährleistet, mit Hilfe einer dezentralen, von vielen Teilnehmern gemeinsam genutzten Datenbank, Informationen fälschungssicher zu übermitteln (Abideen et al., 2021; Rehman Khan et al., 2022). Diese Eigenschaften können zum Beispiel genutzt werden, um die Kommunikation und den Informationsaustausch zwischen unterschiedlichen Akteuren der Kreislaufwirtschaft zu verbessern oder Kosten und Emissionen durch die Verringerung überflüssiger Leerlaufzeiten innerhalb der Logistikprozesse zu verringern (Ajwani-Ramchandani et al., 2021; Lähdeaho and Hilmola, 2020).

Rehman Khan et al. (2022) untersuchen in ihrer Arbeit die Rolle von Block Chain Technologien bei der Einführung zirkulärer Wertschöpfung zur Verbesserung der Unternehmensleistung, wobei der positiver Effekt der Technologie auf unterschiedliche CE-Praktiken (CE Design, Green Production, Recycling und Remanufacturing) nachgewiesen werden konnte (Rehman Khan et al., 2022).

Im Paper „Blockchain for the future of sustainable supply chain management in Industry 4.0“ werden die Möglichkeiten die Blockchain bietet durchleuchtet. So zeigt sich das diese Technologie eingesetzt werden kann, um (1) ein umweltfreundliches

Verhalten der Verbraucher zu fördern, (2) Transparenz über den Produktlebenszyklus zu schaffen, (3) die Systemeffizienz zu steigern und damit Kosten zu senken und (4) Nachhaltigkeitsaspekte in SC Netzwerken zu fördern (Esmailian et al., 2020)

(42) Cloud Computing

Cloud Computing beschreibt ein Modell, das mit wenig Aufwand geteilte Computerressourcen als Dienstleistung, zum Beispiel in Form von Servern oder Applikationen, bereitstellt (Song and Moon, 2017). Damit wird es möglich die funktionale Leistung, das Produktlebensdauermanagement, das Abfallmanagement, Auswirkungen auf die Sicherheit und Gesundheit von Mitarbeiter:innen zu verbessern und Herstellkosten zu reduzieren (Daniyan et al., 2021; Enyoghasi and Badurdeen, 2021; Fisher et al., 2020; Frank et al., 2019; Gholami et al., 2021; Song and Moon, 2017).

(43) Cyber Physical System (CPS)

Das Cyber-Physical System (CPS) ist eine aufstrebende Technologie, die eingesetzt wird, um Daten bzw. Informationen von spezifischen Sub-Engineering-Systemen echtzeitnah auszutauschen, zu verknüpfen und zu sammeln. Mit den Einsatz dieser Technologie wird eine Steigerung der Effizienz, Funktionalität, Autonomie, Anpassungsfähigkeit und Zuverlässigkeit der Systeme erzielt (Fisher et al., 2020; Gholami et al., 2021; Patil et al., 2022).

Zur Übernahme des Paradigma der Kreislaufwirtschaft werden CPS derzeit für das EOL-Management von Elektronikprodukten (Patil et al., 2022) oder für das zirkuläre SC Management (Dev et al., 2020; Martín-Gómez et al., 2021) eingesetzt.

(44) Internet of Things

Internet of Things (IoT) Technologien versuchen Kommunikationsprobleme zwischen den Objekten und Systemen in einer Fabrik zu lösen. Mit der Kombination von intelligenten, autonomen Maschinen, fortschrittlicher prädiktiver Analytik und der Kollaboration zwischen Mensch und Maschine, wird im industriellen Umfeld eine Verbesserung der Effizienz, Produktivität und Zuverlässigkeit anvisiert (Laskurain-Isturbe et al., 2021).

Unter Anbetracht der Nachhaltigkeitsdimensionen bringt die Anwendung von IoT Technologie sowohl aus ökonomischer, ökologischer als auch sozialer Sicht Vorteile. So lassen sich mit ihr Kosten senken, die Produktqualität verbessern, die Lebensdauer der Produkte verlängern, Material- und Energieverbräuche sowie Emissionen reduzieren, das EOL-, Nachhaltiges Supply Chain- und Abfall-Management erleichtern, Recyclingprozesse vorantreiben, die Rückführlogistik unterstützen und die Gesundheit des Personals sowie Betriebssicherheit steigern (Blunck and Werthmann,

2017; Cioffi et al., 2020; Enyoghasi and Badurdeen, 2021; Esmailian et al., 2020; Fisher et al., 2020; Frank et al., 2019; Gholami et al., 2021; Kintscher et al., 2020; Laskurain-Iturbe et al., 2021; Liao, 2018; Pandian and Abdul-Kader, 2017; Shi et al., 2012; Tao et al., 2018; Wang et al., 2016).

(45) Simulation and Modelling

Simulationen und Modelle, wie beispielsweise Discret Event Simulation (DES), System Dynamics (SD) und die Agent-Based (AB) Simulation werden häufig für die Vorhersage des Verhaltens realer komplexer Fertigungssysteme eingesetzt, um zum Beispiel die Produktionsplanung, die Terminierung oder das Supply Chain Management zu unterstützen (Abideen et al., 2020; Goodall et al., 2019).

Im Kontext der Kreislaufwirtschaft ist die Simulation vielseitig einsetzbar und kann beispielsweise herangezogen werden, um den Materialfluss im Remanufacturing-Prozess zu prognostizieren und damit den Entscheidungsprozess zu unterstützen (Charnley et al., 2019; Goodall et al., 2019). Zudem werden Simulationen eingesetzt, um den Nachhaltigkeitsnutzen zu bewerten oder Schwachstellen und Verschwendung im Produktionsprozess zu identifizieren (Enyoghasi and Badurdeen, 2021; Song and Moon, 2017). Im Anwendungsfeld zirkulärer Fertigungssysteme (CMS) spielt die Modellierung und Simulation komplexer Wertschöpfungssysteme eine entscheidende Rolle, um quantitativ und qualitative Erkenntnisse über das Verhalten dieser Systeme zu gewinnen und den Prozess der Entscheidungsfindung zu unterstützen (Roci et al., 2022a, 2022b).

Fisher et al. (2020) setzt die datengesteuerte Modellierung ein, um den Einsatz von CE-Prinzipien in Produktionssysteme voranzutreiben, mit speziellem Fokus auf die Abfallverwertung und die Prozessbeständigkeit (Fisher et al., 2020). Im Paper „Circular production and maintenance of automotive parts: An Internet of Things (IoT) data framework and practice review“ wird ein IoT-basiertes zirkuläres Simulationstool für die Automobilbranche vorgestellt, um Datenströme, Ergebnissätze und Was-Wäre-Wenn-Szenarien für die zirkuläre Instandhaltung und für Remanufacturing- und Recycling-Prozesse bereitzustellen (Turner et al., 2022).

Ein digitaler Zwilling, englisch Digital Twin (DT), wird ebenfalls zur Simulation herangezogen und ist in der produzierenden Industrie als eine digitale Nachbildung des physischen Systems (z.B. die gesamte Lieferkette) oder integraler Teile davon (z.B. eine Fabrik, eine Produktionslinie) zu verstehen. Dabei soll der Digital Twin: (i) ein hinreichend genaues virtuelles Modell des realen Systems darstellen, (ii) die Möglichkeit bieten sowohl den physischen Zustand als auch das Verhalten des Systems simulieren zu können, (iii) eindeutig mit den spezifischen Instanzen des Systems und seiner Elemente verknüpfbar sein und (iv) mit dem System verbunden sein und gegebenenfalls auf Zustandsänderungen des Systems reagieren

(Kalaboukas et al., 2021). Digitale Zwillinge werden im Sinne des Konzepts der Kreislaufwirtschaft aktuell primär in Verbindung mit Supply Chain (SC) Management eingesetzt. Da die Gestaltung von Lieferketten für zirkuläre Güter eine große Herausforderung darstellt, werden DT verwendet, um logistische Szenarien realistisch abbilden zu können und damit den Entscheidungsfindungsprozess zu unterstützen (Abideen et al., 2021; Kalaboukas et al., 2021).

(46) Robotics

Die Anwendung von Robotern im industriellen Umfeld ist eine gängige Praxis, um Prozesse zu automatisieren (Laskurain-Iturbe et al., 2021). Aus dem Gesichtspunkt der Nachhaltigkeit können Roboter eingesetzt werden, um den Prozess des Abfall-Managements zu automatisieren und damit Zeit und Ressourcen einzusparen (Laskurain-Iturbe et al., 2021; Noman et al., 2022).

So präsentieren Wilts et al. (2021) ein KI-basiertes Robotersortiersystem für Abfälle, Poschmann et al. (2021) ein Roboter Demontage Framework der den Recycling-Prozess unterstützt oder Khan et al. (2020) eine bildverarbeitungsgeführte Roboterinspektion für Teile in der Fertigungs- und Wiederaufbereitungsindustrie (Khan et al., 2021; Poschmann et al., 2021; Wilts et al., 2021).

Mit steigender Komplexität und Individualität von Montage- und Demontageaufgaben werden kollaborative Eigenschaften der Maschinen zunehmend wichtiger, um autonom und flexibel auf variable Aufgraben reagieren zu können (Hjorth and Chrysostomou, 2022; Laskurain-Iturbe et al., 2021). Zuzufolge Hjorth und Chrysostomou (2022) besteht daher die Notwendigkeit eine Mensch-Maschine Kollaboration für die Demontage zu etablieren.

(47) Virtual and Augmented Reality

Virtual und Augmented Reality (VR und AR) wird ebenfalls eingesetzt, um reale Situationen zu simulieren, um Arbeitnehmer zu schulen, gefährliche Situationen zu vermeiden, den Entscheidungsfindungsprozess zu unterstützen oder mit neuen Verfahren zu arbeiten. Mit Hilfe von VR Brillen kann eine erweiterte Version der Realität geschaffen werden, bei der direkte und indirekte Live-Ansichten von realen physischen Umgebungen durch computergenerierte Overlay-Bilder ergänzt werden. Damit können Wartungsvorgänge innerhalb der Produktion simuliert werden, oder die Zahl der schlecht verarbeiteten Produkte verringert werden und damit die Material- und Energieeffizienz gesteigert werden, was zu einer Reduktion der Herstellkosten führt (Enyoghasi and Badurdeen, 2021; Gholami et al., 2021; Laskurain-Iturbe et al., 2021; Tao et al., 2018).

4.4 Zusammenfassung der Erkenntnisse

Die Ergebnisse der systematischen Literaturrecherche lassen sich im nachfolgenden SPAR-4-SLR Protokoll nach Paul et al. (2021) zusammenfassen.

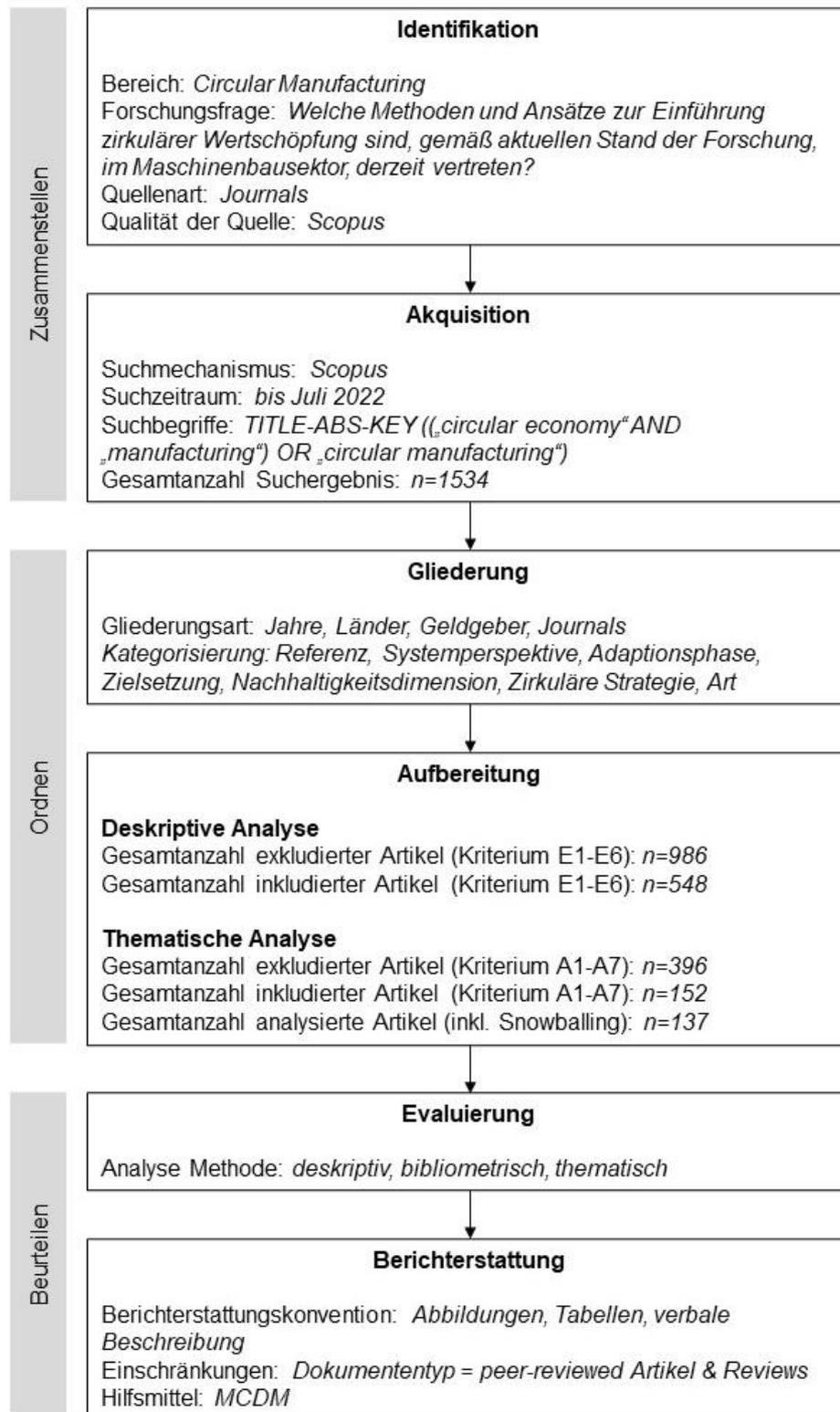


Abbildung 23: Zusammenfassung der Ergebnisse der SLR

Abschließend erfolgt auf Basis vorhergehender Kapitel in Kombination mit den Ergebnissen der SLR eine Zusammenfassung der Erkenntnisse:

- Angesichts der weltweit signifikant steigenden jährlichen und kumulativen Anzahl an Publikationen im Bereich Kreislaufwirtschaft lässt sich ableiten, dass dem Forschungsgebiet eine wachsende Bedeutung zukommt.
- Bereits innerhalb der bibliometrischen Analyse, bei der Untersuchung der Schlüsselwörter, konnten CM Methoden und Ansätze ermittelt werden, die sich in der thematischen Analyse wiederfinden.
- Insgesamt wurden 47 CM Methoden und Ansätze zur Einführung zirkulärer Wertschöpfung auf Mikroebene identifiziert, die gemäß aktuellem Stand der Forschung in der Literatur vertreten sind und angewendet werden.
- Die inhaltliche Analyse ergibt, dass die derzeit verwendeten Methoden und Ansätze im Bereich Circular Manufacturing primär die ökologische Nachhaltigkeitsdimension adressieren und die soziale Dimension zumeist vernachlässigt wird.
- Innerhalb der Analyse können zwei Arten von CM Ansätzen identifiziert werden. Einerseits Methoden bzw. Tools (A1), welche primär für die Bewertung und Überwachung der Zirkularität (Z3) und im Entscheidungsfindungsprozess (Z1) eingesetzt werden und andererseits Technologien (A2), die zur physischen Implementierung (Z2) dienen und ebenfalls als Unterstützungshilfe während der Entscheidungsfindung (Z1) herangezogen werden.
- Die ermittelten CM Methoden und Ansätze lassen sich vielseitig in unterschiedlichen Aufgabenbereichen (Entscheidungsfindung, Physische Implementierung und Bewertung & Überwachung) und innerhalb unterschiedlicher Phasen der CE-Strategie (Pre-Use, Use und Post-Use) einsetzen.
- Neben klassischen Lean-Methoden wie der Wertstromanalyse, werden zudem eine Vielzahl an unterschiedlichen Industrie 4.0 (I4.0) Technologien, darunter Cloud Manufacturing, Digital Twin, IoT, AI, VR, Block-Chain genutzt, um zirkuläre Wertschöpfung auf Mikroebene einzuführen.
- Einige der identifizierten Methoden und Ansätze ergänzen sich gegenseitig und werden in der Literatur in Kombination eingesetzt. So können die unterschiedlichen I4.0 Technologien nahezu beliebig miteinander verknüpft

werden. Die Methode des LCA ist an dieser Stelle besonders hervorzuheben, da sie in der Literatur mit Abstand am häufigsten mit anderen CM Methoden und Ansätzen kombiniert wird.

Zusammenfassend lässt sich auf Basis der inhaltlichen Analyse der Literatur ableiten, dass die Einführung zirkulärer Wertschöpfung nicht von einem Produkt oder einem Akteur ausgehen kann, sondern dass es sich um ein ganzheitliches Konzept handelt, welches auf dem Prinzip der Ressourcenschonung beruht. Dies impliziert, dass die Implementierung der Kreislaufwirtschaft nicht ausschließlich in Teilen des Unternehmens zu erfolgen hat, sondern den Einsatz und das Engagement der gesamten Organisation und ein konsequentes Management aller Akteure erfordert.

5 Bewertung der erhaltenen Ergebnisse

Angesichts der inhärenten Komplexität von zirkulären Systemen hat die Verwendung von MCDM zur Bewertung von Kreislaufwirtschaftsaspekten zugenommen. Mehrere Studien, darunter Shen et al. (2013), Sassanelli et al. (2019), Garcia-Bernabeu et al. (2020) und Alamerew und Brissaud (2019), priorisieren diese Methode zur Bewertung von Kreislaufwirtschaftsstrategien und -leistungen (Alamerew and Brissaud, 2019; Garcia-Bernabeu et al., 2020; Sassanelli et al., 2019; Shen et al., 2013).

Wie in Kapitel 3.3.1 bereits argumentiert, soll deshalb die Methode der multikriteriellen Entscheidungsunterstützung herangezogen werden, um die Kreislauffähigkeit der in Kapitel 4 ermittelten 47 CM Methoden und Ansätze zu bewerten. Die nachfolgenden Kapitel lehnen sich am Aufbau des in Kapitel 3.3.2 vorgestellten Frameworks zur Durchführung multikriterieller Entscheidungsfindung an, vgl. Abbildung 12.

5.1 Sammlung der Daten

Die Zielsetzung der Multi-Criteria Decision Making (MCDM) Methode spiegelt sich in Forschungsfrage 4 wider. Auf Basis dessen wird das oberste Ziel der MCDM Methode wie folgt definiert: *Bewertung der Kreislauffähigkeit der identifizierten CM Methoden und Ansätze*. In der Kriterienhierarchie wird dieses Ziel mit „Kreislauffähigkeit“ abgekürzt.

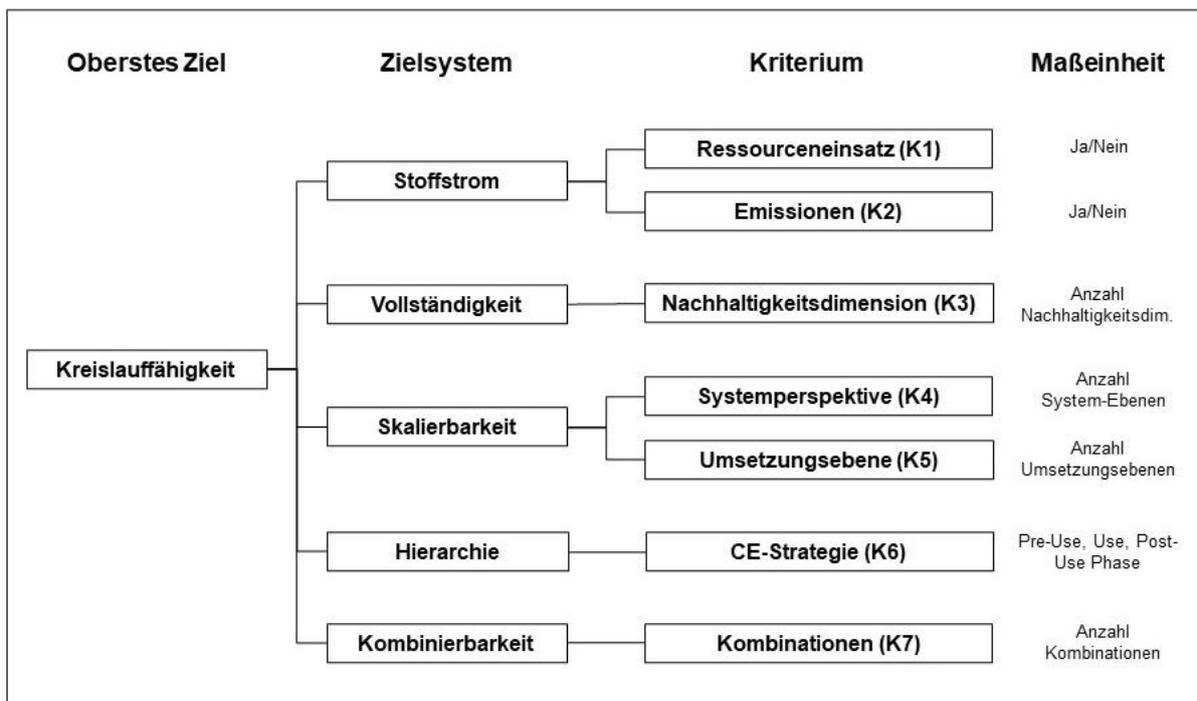


Abbildung 24: Kriterienhierarchie der CM Methoden und Ansätze

Ausgehend von der obersten Zielsetzung werden unterschiedliche Zielsysteme festgelegt, die primär zwei Anforderungen erfüllen müssen. Einerseits muss die Messbarkeit der Zielsysteme bzw. in weiterer Folge der Kriterien gewährleistet sein und andererseits durch sie eine sinnvolle Bewertung der Kreislauffähigkeit ermöglicht werden. Es konnten fünf Zielsysteme und sieben Kriterien identifiziert werden, die in weiterer Folge näher beschrieben werden. Einen Überblick über alle Zielsysteme und Kriterien findet sich in Abbildung 24.

(1) Stoffstrom

Das Konzept der Kreislaufwirtschaft kann als eine Operationalisierung für Unternehmen zur Umsetzung des Konzepts der nachhaltigen Entwicklung angesehen werden, und visiert damit eine absolute Reduktion der physischen Stoffströme an (Ghisellini et al., 2016; Murray et al., 2017; OECD, 2016; UNEP, 2011).

Auf Basis dessen ist auch innerhalb der ermittelten CM Methoden bzw. Ansätze davon auszugehen, dass jene Methoden bzw. Ansätze, die bei ihrer Herstellung bzw. Gebrauch wenig Ressourcen verbrauchen und kaum zusätzliche Emissionen freigesetzt werden zu bevorzugen sind.

Beispiel: Die klassische Wertstromanalyse, ist eine Methode zur Identifizierung nicht wertschöpfender Prozesse. Außer Stift und Papier die zur Aufnahme des ganzheitlichen Wertschöpfungsprozess benötigt werden, werden kaum weitere Ressourcen aufgewendet. Dahingehen werden beim Einsatz von Industrie 4.0 (I4.0) Technologien (BSP: Sensoren), zur Identifizierung von nicht wertschöpfenden Prozessen, sowohl bei der Herstellung der Technologie (Materialaufwand) als auch während dem Gebrauch (Energie) Ressourcen aufgewendet und Emissionen freigesetzt. Deshalb ist die Wertstromanalyse gegenüber I4.0 Technologien aus Hinsicht der Stoffströme zu präferieren.

Diese Tatsache wird im Zielsystem „Stoffstrom“ mit den Kriterien „Ressourceneinsatz“ (K1) und „Emissionen“ (K2) abgebildet. Da nicht bei jeder/m Methode/Tool/Technologie der exakte Ressourceneinsatz bzw. die ausgestoßenen Emissionen messbar sind, beschränkt sich die Maßeinheit beider Kriterien auf „Ja/Nein“. „Nein“ wird verwendet, wenn kaum Ressourcen verbraucht und Schadstoffe emittiert werden (BSP: Wertstromanalyse), „Ja“ wird verwendet, wenn davon auszugehen ist, dass während der Herstellung, des Gebrauchs oder der Entsorgung der Technologie bzw. des Tools ein Ressourceneinsatz bzw. Ausstoß von Emissionen stattfindet (BSP: I4.0 Technologie).

(2) Vollständigkeit

Das Drei-Säulen-Modell der nachhaltigen Entwicklung geht davon aus, dass nachhaltige Entwicklung nur durch das gleichzeitige und gleichberechtigte Umsetzen von ökologischen, ökonomischen und sozialen Zielen erreicht werden kann. Nicht nur Kirchherr et al. (2017) greift in seinen Kodierungsrahmen zur Definition des Kreislaufwirtschaftsbegriffs alle drei Dimensionen auf, sondern auch Autoren wie Acerbi and Taisch (2020) oder Ávila-Gutiérrez et al. (2020), die sich in ihren Werken mit der Kategorisierung von CE Strategien auseinandersetzen (Acerbi and Taisch, 2020; Ávila-Gutiérrez et al., 2020; Kirchherr et al., 2017). Innerhalb des Konzept der Kreislaufwirtschaft wird ebenfalls die gleichzeitige und gleichberechtigte Umsetzung aller drei Nachhaltigkeitsdimensionen wiederholt betont (Kirchherr et al., 2017).

Dieser Tatsache zugrunde liegend, ist bei der Bewertung der Kreislauffähigkeit davon auszugehen, dass Methoden/Tools/Technologien die gleichzeitig mehrere Nachhaltigkeitsdimensionen oder im besten Fall alle drei Dimensionen vollständig adressieren, jenen die nur eine adressieren vorzuziehen sind. Innerhalb des Zielsystem „Vollständigkeit“ wird deshalb das Kriterium „Nachhaltigkeitsdimension“ (K3) eingeführt, dass mit Hilfe der Maßeinheit „Anzahl an adressierten Nachhaltigkeitsdimensionen“ gemessen wird.

(3) Skalierbarkeit

Das Zielsystem „Skalierbarkeit“ wird mit Hilfe von zwei Kriterien („Systemperspektive“ und „Umsetzungsebenen“) abgebildet.

Die Systemperspektive wurde ebenfalls von Kirchherr et al. (2017), Acerbi and Taisch (2020) und Ávila-Gutiérrez et al. (2020) aufgegriffen und spielt in der Publikation von Sitadewi et al. (2021) und Lim et al. (2022) eine essenzielle Rolle bei der Einteilung der CE Prinzipien (Acerbi and Taisch, 2020; Ávila-Gutiérrez et al., 2020; Kirchherr et al., 2017; Lim et al., 2022; Sitadewi et al., 2021). Eine Vielzahl an Autoren, darunter Sakr et al. (2011) und Jackson et al. (2014) argumentieren, dass der Übergang zur Kreislaufwirtschaft auf drei Ebenen zu erfolgen hat, welche als die drei Ebenen des CE-System interpretiert werden können: Die Makro-, Meso- und Mikroebene (Jackson et al., 2014; Kirchherr et al., 2017; Li et al., 2010; Sakr et al., 2011; Zhijun and Nailing, 2007).

Unter dem Kriterium „Systemperspektive“ (K4) wird die Fähigkeit der CM Methode verstanden, sich für den Einsatz auf unterschiedlichen Ebenen des CE-Systems zu eignen. Auf Basis der einleitend erwähnten Werke ist davon auszugehen, dass eine CM Methode/Tool/Technologie die gewissermaßen skalierbar ist und sich für den Einsatz auf mehr als einer Ebene des CE-System eignet, gegenüber jener die nur eine Ebene adressiert, zu präferieren ist (Maßeinheit: Anzahl an adressierten System-Ebenen).

Innerhalb der systematischen Literaturrecherche (SLR) (Forschungsfrage F1) kristallisieren sich drei unterschiedliche Forschungsströme zur Einführung zirkulärer Wertschöpfung in Produktionsunternehmen heraus. Die identifizierten Methoden bzw. Ansätze werden auf drei unterschiedlichen Umsetzungsebenen eingesetzt: „Entscheidungsfindung“, „Physische Implementierung“ und „Bewertung & Überwachung der Zirkularität“. Diese Erkenntnis deckt sich auch mit den von Acerbi und Taisch (2020) publizierten Paper (Acerbi and Taisch, 2020).

Im Kriterium „Umsetzungsebene“ (K5) wird, auf gleicher Argumentationsbasis wie beim vorhergehenden Kriterium, ebenfalls davon ausgegangen, dass jene Methoden/Tools/Technologien, die auf unterschiedlichen Umsetzungsebenen eingesetzt werden können, besser skalierbar und deshalb zu bevorzugen sind (Maßeinheit: Anzahl an adressierten Aufgabenbereichen).

(4) Hierarchie

In Einklang mit dem Werk von Kirchherr et al. (2017) erfolgte innerhalb der SLR eine Zuordnung der CM Methoden/Tools/Technologien zu den unterschiedlichen Phasen („Pre-Use“, „Use“ und „Post-Use“ Phase) (Kirchherr et al., 2017). Die Reihenfolge der Phasen folgt dabei einer Hierarchie, demzufolge die erste Phase der zweiten und die Zweite der Dritten zu priorisieren ist, siehe Charter und Tischner (2017), Kirchherr et al. (2017) und McDonough und Braungart (2002).

Diese Tatsache wird mit Hilfe des Zielsystem „Hierarchie“ unter Verwendung des Kriteriums „CE-Strategie“ (K6) abgebildet. Dazu werden die Methoden/Tools/Technologien je nachdem welcher Phase sie zugeordnet werden können bewertet (Maßeinheit: „Pre-Use“ = höchster Wert, „Use“ = mittlerer Wert, „Post-Use“ = niedrigster Wert).

(5) Kombinierbarkeit

Während der SLR hat sich gezeigt, dass einige der CM Methoden, Tools bzw. Technologien in der Literatur häufiger miteinander kombiniert werden als andere. Ein Vorzeigebeispiel dafür ist die Methode des Life Cycle Assessment (LCA). So verbinden Abbate et al. (2022) und Gouveia et al. (2022) LCA mit LCC, García-Muina et al. (2021) mit I4.0 Technologien, Niero und Kalbar (2019) mit MCDM, Scheepens et al. (2016) und Chen und Huang (2019) mit PSS und Martínez-Cámara et al. (2021) mit Eco-Design.

Als letztes Kriterium wird deshalb „Kombinationen“ (K7) eingeführt, das die „Kombinierbarkeit“ der einzelnen CM Methoden und Ansätze widerspiegelt (Maßeinheit: Anzahl an möglichen Kombinationen).

5.2 Extraktion der Messwerte

Nachdem die Kriterien eruiert werden konnten, bedarf es einer Transformation aller qualitativen Maßeinheiten in quantifizierbare Werte. Dazu wird folgendes Umwandlungsschema herangezogen. Für die Kriterien K3, K4 und K5 erfolgt die Transformation anhand der Merkmalausprägungen, gemäß Kapitel 4.3, wie folgt.

| Merkmalausprägung | Wert |
|--------------------------------|------|
| ● Merkmal ausgeprägt | 2 |
| ◐ Merkmal teilweise ausgeprägt | 1 |
| ○ Merkmal nicht ausgeprägt | 0 |

Tabelle 9: Umwandlungsschema Kriterien K3 bis K5

Beim Kriterium „CE-Strategie“ wird die hierarchische Struktur der einzelnen Phasen berücksichtigt, weshalb das Umwandlungsschema entsprechend adaptiert wird, vgl. Tabelle 10.

| Merkmalausprägung | Pre-Use Phase | Use Phase | Post-Use Phase |
|--------------------------------|---------------|-----------|----------------|
| ● Merkmal ausgeprägt | 4 | 2 | 2 |
| ◐ Merkmal teilweise ausgeprägt | 2 | 1 | 0,5 |
| ○ Merkmal nicht ausgeprägt | 0 | 0 | 0 |

Tabelle 10: Umwandlungsschema Kriterium K6

Die beiden Kriterien (K1, K2) des Zielsystems „Stoffstrom“ können wie folgt umgewandelt werden:

| Maßeinheit | Wert |
|------------|------|
| Nein | 1 |
| Ja | 0 |

Tabelle 11: Umwandlungsschema Kriterien K1 und K2

Die Anzahl an Kombinationen wird in Bereiche unterteilt, denen ebenfalls ein Wert zugeordnet wird, vgl. Tabelle 12.

| Anzahl an Kombinationen | Wert |
|-------------------------|------|
| > 6 | 4 |
| 4-5 | 3 |
| 2-3 | 2 |
| 1 | 1 |
| 0 | 0 |

Tabelle 12: Umwandlungsschema Kriterium K7

Darauf aufbauen kann die Entscheidungsmatrix folgenderweise dargestellt werden, vgl. Tabelle 13.

| | (K1) | (K2) | (K3) | (K4) | (K5) | (K6) | (K7) |
|-------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| VSM | 1 | 1 | 6 | 3 | 3 | 4 | 2 |
| TRIZ Methode | 1 | 1 | 5 | 2 | 2 | 4 | 0 |
| Resource Pressure Methode | 1 | 1 | 3 | 2 | 4 | 4 | 0 |
| RIFF | 1 | 1 | 3 | 2 | 3 | 2 | 0 |
| Modular design support system | 1 | 1 | 3 | 2 | 2 | 4 | 0 |
| Engineering Design Method | 1 | 1 | 3 | 4 | 2 | 4 | 2 |
| Eco-Design | 1 | 1 | 6 | 2 | 4 | 4 | 2 |
| Concept Circularity Evaluation Tool | 1 | 1 | 6 | 2 | 3 | 4 | 0 |
| Circular Product Design | 1 | 1 | 6 | 2 | 4 | 4 | 0 |
| Recyclability Assessment Method | 1 | 1 | 2 | 2 | 4 | 4 | 0 |
| Orientation Events | 1 | 1 | 6 | 4 | 2 | 4 | 0 |
| General Morphologic Analysis | 1 | 1 | 6 | 2 | 2 | 4 | 1 |
| Circularity Measurement Toolkit | 1 | 1 | 4 | 2 | 2 | 4 | 0 |
| MCDM | 1 | 1 | 4 | 3 | 5 | 7 | 2 |
| MGDM Technique | 1 | 1 | 4 | 2 | 4 | 4 | 0 |
| Decision Making Support Tools | 1 | 1 | 4 | 2 | 4 | 7 | 0 |
| Circularity Indicator Tool | 1 | 1 | 6 | 2 | 2 | 4 | 0 |
| Environmental Performance Indicator | 1 | 1 | 2 | 2 | 4 | 3 | 0 |
| Ecological Rucksack | 1 | 1 | 2 | 6 | 3 | 4 | 0 |
| PtP Indikator | 1 | 1 | 3 | 2 | 2 | 4 | 0 |
| Digital Passport | 1 | 0 | 3 | 6 | 4 | 1 | 0 |
| Embodied Energy Analysis | 1 | 1 | 3 | 2 | 4 | 4 | 0 |
| FMEA | 1 | 1 | 3 | 2 | 2 | 4 | 1 |
| Trade-Off Analysis | 1 | 1 | 4 | 2 | 2 | 4 | 0 |
| Life Cycle Gap Analysis | 1 | 1 | 3 | 2 | 2 | 4 | 1 |
| Material Flow Analysis | 1 | 1 | 2 | 6 | 4 | 4 | 2 |
| Waste Input-Output Analysis | 1 | 1 | 4 | 6 | 3 | 2 | 2 |
| Maturity Model | 1 | 1 | 4 | 4 | 6 | 6 | 0 |
| LCA | 1 | 1 | 6 | 6 | 6 | 6 | 4 |
| LCC | 1 | 1 | 3 | 4 | 4 | 4 | 1 |
| Self-Assessment Readiness Tool | 1 | 0 | 2 | 2 | 4 | 4 | 0 |
| CRM Tool | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 4 | 0 |
| Design Navigator | 1 | 1 | 2 | 2 | 3 | 4 | 1 |
| Product Service System | 1 | 1 | 6 | 3 | 2 | 7 | 3 |
| Adaptive Disassembly Planner | 0 | 0 | 4 | 2 | 3 | 3 | 3 |
| Multi-Level Demand-Response Model | 0 | 0 | 4 | 2 | 2 | 4 | 3 |
| Programming Algorithm | 1 | 0 | 4 | 3 | 2 | 7 | 3 |
| Additive Manufacturing | 0 | 0 | 4 | 2 | 2 | 7 | 2 |
| AI | 0 | 0 | 6 | 5 | 6 | 7 | 4 |
| Big Data Analytics | 0 | 0 | 6 | 5 | 4 | 5,5 | 4 |
| Block-Chain | 0 | 0 | 4 | 5 | 4 | 5,5 | 4 |
| Cloud Computing | 0 | 0 | 6 | 4 | 6 | 5 | 4 |
| Cyber Physical System | 0 | 0 | 4 | 4 | 2 | 3 | 4 |
| IoT | 0 | 0 | 5 | 5 | 6 | 7 | 4 |
| Modelling & Simulation | 0 | 0 | 5 | 6 | 6 | 7 | 4 |
| Robotics | 0 | 0 | 4 | 4 | 2 | 7 | 3 |
| VR & AR | 0 | 0 | 6 | 4 | 4 | 4 | 2 |

Tabelle 13: Ergebnis Entscheidungsmatrix

5.3 Kriteriengewichtung

Die Kriteriengewichtung folgt der Analytic Hierarchy Process (AHP) Methode, vgl. Kapitel 3.3.3. Dazu werden die Kriterien paarweise miteinander verglichen. Die hierfür verwendete Bewertungsskala ist Tabelle 3 zu entnehmen. Das Ergebnis der komparativen Beurteilung wird in der nachfolgenden Wichtigkeitsmatrix dargestellt.

| | (K1) | (K2) | (K3) | (K4) | (K5) | (K6) | (K7) |
|------|-------|-------|-------|------|------|-------|-------|
| (K1) | 1 | 1 | 0,5 | 3 | 4 | 0,25 | 2 |
| (K2) | 1 | 1 | 0,5 | 3 | 4 | 0,25 | 2 |
| (K3) | 2 | 2 | 1 | 4 | 5 | 0 | 3 |
| (K4) | 0,333 | 0,333 | 0,25 | 1 | 2 | 0,167 | 0,5 |
| (K5) | 0,25 | 0,25 | 0,2 | 0,5 | 1 | 0 | 0,333 |
| (K6) | 4 | 4 | 3 | 6 | 7 | 1 | 5 |
| (K7) | 0,5 | 0,5 | 0,333 | 2 | 3 | 0,2 | 1 |

Tabelle 14: Ergebnis Wichtigkeitsmatrix

Die Wichtigkeitsmatrix wird mit Hilfe von Gleichung 1 normiert und anschließend wird zufolge Gleichung 2 die Kriteriengewichtung berechnet. Das Ergebnis der Normierung bzw. die finale Kriteriengewichtung ist in Tabelle 15 dargestellt.

| | (K1) | (K2) | (K3) | (K4) | (K5) | (K6) | (K7) | Kriterien- gewichtung |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------------------------|
| (K1) | 0,110 | 0,110 | 0,086 | 0,154 | 0,154 | 0,107 | 0,145 | 0,1236595 |
| (K2) | 0,110 | 0,110 | 0,086 | 0,154 | 0,154 | 0,107 | 0,145 | 0,1236595 |
| (K3) | 0,220 | 0,220 | 0,173 | 0,205 | 0,192 | 0,142 | 0,217 | 0,1956939 |
| (K4) | 0,037 | 0,037 | 0,043 | 0,051 | 0,077 | 0,071 | 0,036 | 0,0503014 |
| (K5) | 0,028 | 0,028 | 0,035 | 0,026 | 0,038 | 0,061 | 0,024 | 0,0341147 |
| (K6) | 0,440 | 0,440 | 0,519 | 0,308 | 0,269 | 0,427 | 0,361 | 0,3949520 |
| (K7) | 0,055 | 0,055 | 0,058 | 0,103 | 0,115 | 0,085 | 0,072 | 0,0776189 |

Tabelle 15: Ergebnis Kriteriengewichtung

5.4 Bewertung und Ranking

Die Bewertung der Kriterien wird mit Hilfe der „Technique for Order Preferences by Similarity“ (TOPSIS) Methode durchgeführt. Diese beruht auf einer Aggregationsfunktion, die die relative Nähe zu den idealen und nicht-idealen Werten als Referenzebene darstellen (Garcia-Bernabeu et al., 2020). Zunächst erfolgt die Normierung der Bewertungsmatrix zufolge Gleichung 3. Anschließend wird die Kriteriengewichtung mit dem jeweiligen normierten Alternativen-Wert multipliziert, um eine gewichtete normierte Entscheidungsmatrix, engl. Weighted Normalized Decision Matrix (WNDM) zu erhalten, vgl. Tabelle 16.

| | (K1) | (K2) | (K3) | (K4) | (K5) | (K6) | (K7) |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| VSM | 0,014 | 0,015 | 0,041 | 0,007 | 0,004 | 0,049 | 0,019 |
| TRIZ Methode | 0,014 | 0,015 | 0,035 | 0,004 | 0,003 | 0,049 | 0 |
| Resource Pressure Methode | 0,014 | 0,015 | 0,021 | 0,004 | 0,006 | 0,049 | 0 |
| RIFF | 0,014 | 0,015 | 0,021 | 0,004 | 0,004 | 0,025 | 0 |
| Modular design support system | 0,014 | 0,015 | 0,021 | 0,004 | 0,003 | 0,049 | 0 |
| Engineering Design Method | 0,014 | 0,015 | 0,021 | 0,009 | 0,003 | 0,049 | 0,019 |
| Eco-Design | 0,014 | 0,015 | 0,041 | 0,004 | 0,006 | 0,049 | 0,019 |
| Concept Circularity Evaluation Tool | 0,014 | 0,015 | 0,041 | 0,004 | 0,004 | 0,049 | 0 |
| Circular Product Design | 0,014 | 0,015 | 0,041 | 0,004 | 0,006 | 0,049 | 0 |
| Recyclability Assessment Method | 0,014 | 0,015 | 0,014 | 0,004 | 0,006 | 0,049 | 0 |
| Orientation Events | 0,014 | 0,015 | 0,041 | 0,009 | 0,003 | 0,049 | 0 |
| General Morphologic Analysis | 0,014 | 0,015 | 0,041 | 0,004 | 0,003 | 0,049 | 0,009 |
| Circularity Measurement Toolkit | 0,014 | 0,015 | 0,028 | 0,004 | 0,003 | 0,049 | 0 |
| MCDM | 0,014 | 0,015 | 0,028 | 0,007 | 0,007 | 0,086 | 0,019 |
| MGDM Technique | 0,014 | 0,015 | 0,028 | 0,004 | 0,006 | 0,049 | 0 |
| Decision Making Support Tools | 0,014 | 0,015 | 0,028 | 0,004 | 0,006 | 0,086 | 0 |
| Circularity Indicator Tool | 0,014 | 0,015 | 0,041 | 0,004 | 0,003 | 0,049 | 0 |
| Environmental Performance Indicator | 0,014 | 0,015 | 0,014 | 0,004 | 0,006 | 0,037 | 0 |
| Ecological Rucksack | 0,014 | 0,015 | 0,014 | 0,013 | 0,004 | 0,049 | 0 |
| PtP Indikator | 0,014 | 0,015 | 0,021 | 0,004 | 0,003 | 0,049 | 0 |
| Digital Passport | 0,014 | 0 | 0,021 | 0,013 | 0,006 | 0,012 | 0 |
| Embodied Energy Analysis | 0,014 | 0,015 | 0,021 | 0,004 | 0,006 | 0,049 | 0 |
| FMEA | 0,014 | 0,015 | 0,021 | 0,004 | 0,003 | 0,049 | 0,009 |
| Trade-Off Analysis | 0,014 | 0,015 | 0,028 | 0,004 | 0,003 | 0,049 | 0 |
| Life Cycle Gap Analysis | 0,014 | 0,015 | 0,021 | 0,004 | 0,003 | 0,049 | 0,009 |
| Material Flow Analysis | 0,014 | 0,015 | 0,014 | 0,013 | 0,006 | 0,049 | 0,019 |
| Waste Input-Output Analysis | 0,014 | 0,015 | 0,028 | 0,013 | 0,004 | 0,025 | 0,019 |
| Maturity Model | 0,014 | 0,015 | 0,028 | 0,009 | 0,008 | 0,074 | 0 |
| LCA | 0,014 | 0,015 | 0,041 | 0,013 | 0,008 | 0,074 | 0,037 |

| | | | | | | | |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| LCC | 0,014 | 0,015 | 0,021 | 0,009 | 0,006 | 0,049 | 0,009 |
| Self-Assessment Readiness Tool | 0,014 | 0 | 0,014 | 0,004 | 0,006 | 0,049 | 0 |
| CRM Tool | 0,014 | 0,015 | 0,014 | 0,004 | 0,003 | 0,049 | 0 |
| Design Navigator | 0,014 | 0,015 | 0,014 | 0,004 | 0,004 | 0,049 | 0,009 |
| Product Service System | 0,014 | 0,015 | 0,041 | 0,007 | 0,003 | 0,086 | 0,028 |
| Adaptive Disassembly Planner | 0 | 0 | 0,028 | 0,004 | 0,004 | 0,037 | 0,028 |
| Multi-Level Demand-Response Model | 0 | 0 | 0,028 | 0,004 | 0,003 | 0,049 | 0,028 |
| Programming Algorithm | 0,014 | 0 | 0,028 | 0,007 | 0,003 | 0,086 | 0,028 |
| Additive Manufacturing | 0 | 0 | 0,028 | 0,004 | 0,003 | 0,086 | 0,019 |
| AI | 0 | 0 | 0,041 | 0,011 | 0,008 | 0,086 | 0,037 |
| Big Data Analytics | 0 | 0 | 0,041 | 0,011 | 0,006 | 0,068 | 0,037 |
| Block-Chain | 0 | 0 | 0,028 | 0,011 | 0,006 | 0,068 | 0,037 |
| Cloud Computing | 0 | 0 | 0,041 | 0,009 | 0,008 | 0,062 | 0,037 |
| Cyber Physical System | 0 | 0 | 0,028 | 0,009 | 0,003 | 0,037 | 0,037 |
| IoT | 0 | 0 | 0,035 | 0,011 | 0,008 | 0,086 | 0,037 |
| Modelling & Simulation | 0 | 0 | 0,035 | 0,013 | 0,008 | 0,086 | 0,037 |
| Robotics | 0 | 0 | 0,028 | 0,009 | 0,003 | 0,086 | 0,028 |
| VR & AR | 0 | 0 | 0,041 | 0,009 | 0,006 | 0,049 | 0,019 |

Tabelle 16: Ergebnis gewichtete normierte Entscheidungsmatrix

Anhand der WNDM werden für jedes Kriterium die beste (V_w^+) bzw. schlechteste (V_w^-) hypothetische Ideallösung ermittelt, vgl. Gleichung 4 (Ahmed et al., 2022; Stankevičienė and Nikanorova, 2020).

| | | | | | | | |
|---------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | (K1) | (K2) | (K3) | (K4) | (K5) | (K6) | (K7) |
| V_w^+ | 0,014 | 0,015 | 0,041 | 0,013 | 0,008 | 0,086 | 0,037 |
| V_w^- | 0 | 0 | 0,014 | 0,004 | 0,003 | 0,012 | 0 |

Tabelle 17: Ergebnis beste und schlechteste hypothetische Ideallösung

Der nächste Schritt ist die Berechnung der euklidischen Distanz zur besten und schlechtesten hypothetischen Ideallösung unter Verwendung der Gleichung 5 und Gleichung 6, auf Basis dessen die Leistungskennzahl mit Hilfe Gleichung 7 berechnet wird. Die endgültige Rangfolge ergibt sich aus der Reihung der Leistungskennzahlen. Die Ergebnisse dieses Prozesses sind in Tabelle 18 zusammengefasst.

| | S_r^+ | S_r^- | C_r | Ranking |
|--|------------|------------|------------|---------|
| Product Service System | 0,012743 | 0,08635723 | 0,87141302 | 1 |
| LCA | 0,01233513 | 0,08061834 | 0,86729776 | 2 |
| AI | 0,02068779 | 0,08784333 | 0,80938378 | 3 |
| Modelling & Simulation | 0,02170365 | 0,08611041 | 0,79869367 | 4 |
| IoT | 0,02181316 | 0,0859165 | 0,79751945 | 5 |
| Programming Algorithm | 0,02397469 | 0,08162435 | 0,77296488 | 6 |
| MCDM | 0,02420462 | 0,08040274 | 0,76861455 | 7 |
| Robotics | 0,02744255 | 0,0804655 | 0,7456858 | 8 |
| Big Data Analytics | 0,02789902 | 0,0727732 | 0,72287272 | 9 |
| Additive Manufacturing | 0,03274932 | 0,07757944 | 0,70316607 | 10 |
| Block-Chain | 0,03113956 | 0,06871672 | 0,6881562 | 11 |
| Cloud Computing | 0,03241763 | 0,06818733 | 0,67777304 | 12 |
| Decision Making Support Tools | 0,04091694 | 0,07810349 | 0,65621922 | 13 |
| Maturity Model | 0,04196601 | 0,06685483 | 0,61435686 | 14 |
| VSM | 0,0421899 | 0,05398436 | 0,56131818 | 15 |
| Eco-Design | 0,04246551 | 0,05399593 | 0,55976702 | 16 |
| General Morphologic Analysis | 0,04758621 | 0,05143249 | 0,51942197 | 17 |
| VR & AR | 0,04657633 | 0,0501139 | 0,51829335 | 18 |
| Multi-Level Demand-Response Model | 0,04668702 | 0,04845035 | 0,50926726 | 19 |
| Engineering Design Method | 0,04691119 | 0,04700173 | 0,50048204 | 20 |
| Orientation Events | 0,05309572 | 0,05076366 | 0,48877298 | 21 |
| Circular Product Design | 0,05340672 | 0,05065479 | 0,48677737 | 22 |
| Concept Circularity Evaluation Tool | 0,0535005 | 0,05059538 | 0,48604592 | 23 |
| Material Flow Analysis | 0,04992336 | 0,04718621 | 0,48590692 | 24 |
| Circularity Indicator Tool | 0,05363152 | 0,05057556 | 0,48533708 | 25 |
| TRIZ Methode | 0,05407559 | 0,04714958 | 0,46578907 | 26 |
| LCC | 0,05112401 | 0,04421474 | 0,46376465 | 27 |
| FMEA | 0,05191253 | 0,04390742 | 0,45822837 | 28 |
| Life Cycle Gap Analysis | 0,05191253 | 0,04390742 | 0,45822837 | 28 |
| Cyber Physical System | 0,05567916 | 0,04709153 | 0,45821949 | 30 |
| MGDM Technique | 0,05516879 | 0,04463134 | 0,44720724 | 31 |
| Circularity Measurement Toolkit | 0,05538643 | 0,0445414 | 0,44573565 | 32 |
| Trade-Off Analysis | 0,05538643 | 0,0445414 | 0,44573565 | 32 |
| Design Navigator | 0,0549152 | 0,04338245 | 0,44133762 | 34 |
| Resource Pressure Methode | 0,05729522 | 0,04299382 | 0,42869913 | 35 |
| Embodied Energy Analysis | 0,05729522 | 0,04299382 | 0,42869913 | 35 |
| Modular design support system | 0,05750481 | 0,04290045 | 0,4272729 | 37 |
| PtP Indikator | 0,05750481 | 0,04290045 | 0,4272729 | 37 |
| Ecological Rucksack | 0,05959301 | 0,04325356 | 0,42056396 | 39 |
| Recyclability Assessment Method | 0,06014604 | 0,04243394 | 0,41366688 | 40 |
| CRM Tool | 0,06034574 | 0,04233933 | 0,41232217 | 41 |
| Adaptive Disassembly Planner | 0,05683951 | 0,03985804 | 0,41219286 | 42 |
| Self-Assessment Readiness Tool | 0,06195669 | 0,03974361 | 0,3907915 | 43 |
| Waste Input-Output Analysis | 0,06605229 | 0,03456293 | 0,34351594 | 44 |
| Environmental Performance Indicator | 0,06842978 | 0,03224689 | 0,32030151 | 45 |
| RIFF | 0,07567863 | 0,02500418 | 0,24834609 | 46 |
| Digital Passport | 0,08680887 | 0,01828197 | 0,17396353 | 47 |

Tabelle 18: Rangfolge CM Methoden und Ansätze

6 Validierung

Die Validierung des MCDM Modells ist ein essentieller Bestandteil, um Akzeptanz zu schaffen (Nadkarni and Puthuvayi, 2020). Voraussetzung dafür ist, dass das entwickelte Modell objektiv, logisch und aussagekräftig ist. Innerhalb der Literaturanalyse von Nadkarni und Puthuvayi (2020) werden unterschiedliche Methoden für die Validierung eines MCDM-Modells diskutiert. Dabei weisen die Autoren darauf hin, dass zur Validierung des Modells ein Vergleich der Ergebnisse mit bekannten Ergebnissen herangezogen werden soll (Nadkarni and Puthuvayi, 2020). Da das entwickelte Modell gemäß aktuellem Stand der Forschung einzigartig ist und folglich nicht mit anderen Ergebnissen verglichen werden kann, wird zufolge Nadkarni und Puthuvayi (2020) auf die Expertenvalidierung zurückgegriffen.

Für die Validierung der identifizierten Kriterien wird die Delphi Methode verwendet, die Rückschlüsse über die Relevanz der einzelnen Kriterien geben soll.

Die Delphi Methode ist ein iteratives Auswertungsverfahren von Expertenmeinungen zu einem zu untersuchenden Problem, und wird so lange fortgeführt bis Konsens zwischen den Expertenmeinungen erzielt wird (Emovon et al., 2018; Solangi et al., 2019). Delphi sammelt und modifiziert die Einschätzungen der Expert:innen unter Zuhilfenahme einer kontinuierlichen Datenerhebung (Moktadir et al., 2019). Klassischerweise wird der Konsens erst in der zweiten oder dritten Iteration des Delphi-Verfahrens erreicht (Emovon et al., 2018). Bei einem kleinen Stichprobenumfang ist es jedoch möglich bereits in der ersten Feedback-Runde Konsens zu erlangen (Giannarou and Zervas, 2014). Für diese Arbeit wird die Delphi Methode aus folgenden Gründen herangezogen: (1) es ist ein verbreiteter Ansatz zur Identifizierung und Validierung von Kriterien unter Verwendung von Expertenmeinungen (Emovon et al., 2018), (2) die Methode folgt einem organisierten Verfahren mit anonymer Bewertung der Antworten, um die kollektive Meinung von Expert:innen zu sammeln (von der Gracht, 2012) und (3) es wird eine gleichberechtigte Mitarbeit der Expert:innen möglich (von der Gracht, 2012). Hierdurch wird der Einfluss von Meinungskonflikten und der Gruppendynamiken minimiert, was zu präziseren Einschätzungen führen soll (Gulati et al., 2018; Turoff and Linstone, 2002).

Angelehnt an die Arbeit von Emovon et al. (2018) und Solangi et al. (2019) kann das Vorgehen bei der Delphi Methode gemäß Abbildung 25 gegliedert werden (Emovon et al., 2018; Solangi et al., 2019).

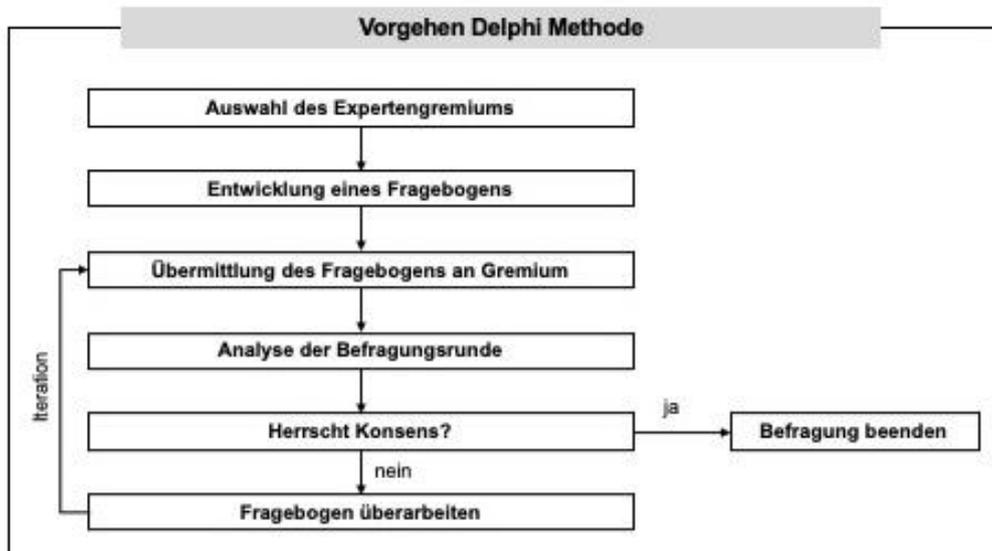


Abbildung 25: Vorgehen bei der Delphi Methode (vgl. Emovon et al., 2018; Solangi et al., 2019)

Eine der größten Herausforderungen bei der Durchführung der Delphi Methode stellt zufolge Devaney und Henchion (2018) die Auswahl des Expertengremiums dar (Devaney and Henchion, 2018). Aufgrund dessen werden die Expert:innen für diese Validierung, angelehnt an die Arbeit von Nadkarni und Puthuvayi (2020), anhand folgender Kriterien ausgewählt: (1) Wissen und Erfahrung mit dem zu untersuchenden Thema (Kreislaufwirtschaft), (2) aktuelle Arbeitsposition beinhaltet das Forschungsthema Nachhaltigkeit (3) Verfügbarkeit und Interesse an der Teilnahme der Untersuchung. Auf Basis dessen wurden sechs Expert:innen in das Expertengremium aufgenommen. Dem Profil nach handelt es sich bei den Expert:innen und Forscher:innen, die in ihrem Berufsleben bereits Erfahrungen im Bereich Kreislaufwirtschaft gesammelt haben und sich aktuell in ihrer Arbeit mit dem Thema Nachhaltigkeit auseinandersetzen. Zu ihren Forschungsschwerpunkten gehören: Kreislaufwirtschaft, Remanufacturing, energieeffiziente Produktion, Eco-Design und nachhaltiges Wertstrommanagement.

Der entwickelte Fragebogen kann dem Anhang entnommen werden. Er ist in zwei Abschnitte unterteilt. Im ersten Abschnitt wird in das Themenfeld der MCDM eingeleitet und die einzelnen Kriterien erläutert. Im zweiten Abschnitt erfolgt anschließend die eigentliche Umfrage. Wie die Analyse des Fragebogens zeigt, konnte bereits innerhalb der ersten Iteration Konsens unter den Experten erreicht werden. Zuzufolge der Expert:innen eignen sich alle sieben ausgewählten Kriterien für die Bewertung der Kreislauffähigkeit der CM Methoden und Ansätze. Innerhalb des Fragebogens wurde zudem die Möglichkeit geboten, abzustimmen, ob die ausgewählten Kriterien ausreichend sind, um die Kreislauffähigkeit der CM Methoden und Ansätze hinreichend bewerten zu können. Alle Expert:innen waren sich einig darüber, dass die sieben ausgewählten Kriterien ausreichend sind.

Die einzelnen Kriterien wurden innerhalb des Fragebogens zudem hinsichtlich ihrer Relevanz bzw. Notwendigkeit bewertet. Die Ergebnisse der Bewertung ist der nachfolgenden Tabelle zu entnehmen.

| | Experte 1 | Experte 2 | Experte 3 | Experte 4 | Experte 5 | Experte 6 |
|--------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Ressourceneinsatz | ● | ● | ● | ● | ◐ | ● |
| Emissionen | ◐ | ◐ | ● | ◐ | ◐ | ◐ |
| Nachhaltigkeitsdimension | ◐ | ◐ | ◐ | ● | ● | ◐ |
| Systemperspektive | ● | ● | ◐ | ◐ | ◐ | ● |
| Umsetzungsebene | ● | ● | ● | ◐ | ● | ● |
| CE Strategie | ● | ● | ◐ | ● | ● | ● |
| Kombinationen | ● | ◐ | ● | ● | ◐ | ● |

● essenziell ◐ nützlich, aber nicht essenziell ○ nicht notwendig

Tabelle 19: Validierungsergebnisse der Kriterien

7 Diskussion und Ausblick

In diesem abschließenden Kapitel werden zunächst die Ergebnisse zusammengefasst und die zu Beginn in Kapitel 1.2 definierten Forschungsfragen beantwortet. In weiterer Folge werden die präsentierten Ergebnisse diskutiert und Limitationen der Arbeit angeführt. Zum Abschluss wird ein Ausblick auf Weiterentwicklungen und zukünftige Untersuchungen im Bereich „Circular Manufacturing“ gegeben.

7.1 Diskussion der Ergebnisse

Aufgrund der weitreichenden Folgen des progressiven Anstiegs an Material- und Energiebedarf ist eine Verbesserung der Ressourcenproduktivität von Unternehmen nicht nur aus ökologischer Sicht notwendig, sondern angesichts der zunehmenden Volatilität der Rohstoffpreise zudem aus ökonomischer Sicht sinnvoll. Mit dem Konzept der Kreislaufwirtschaft wird eine Entkopplung des Wirtschaftswachstums vom materiellen Ressourcenverbrauch angestrebt, wodurch die Ressourceneffizienz gesteigert werden kann. Trotz des wachsenden politischen Drucks und dem steigenden wissenschaftlichen Forschungsinteresse stellt die Einführung zirkulärer Wertschöpfung zufolge Wittpahl (2020) eine große Herausforderung für die Industrie dar, dem ein kurzer Handlungszeitraum gegenübersteht. Da der Konsens über mögliche Umsetzungsstrategien bzw. Methoden gemäß Lim et al. (2022) und Wittpahl (2020) noch abgänglich ist, beschäftigte sich diese Arbeit mit der kritischen Betrachtung von Methoden und Ansätzen zur Einführung zirkulärer Wertschöpfung auf Mikroebene mit Fokus auf produzierende Unternehmen im Maschinenbausektor, engl. „Circular Manufacturing“ (CM).

In der Arbeit wurde versucht, derzeit verwendete CM Methoden und Ansätze zu ermitteln und diese kritisch zu durchleuchten. Das Forschungsvorhaben beschränkte sich dabei auf den technischen Kreislauf. Um im nachfolgenden Abschnitt eine objektive Diskussion der Ergebnisse zu gewährleisten, werden die Resultate ausgehend von den Forschungsfragen diskutiert. Folgende vier Forschungsfragen wurden aufgegriffen:

- F1: Welche Methoden und Ansätze zur Einführung der zirkulären Wertschöpfung auf Mikroebene sind, gemäß aktuellem Stand der Forschung, im Maschinenbausektor derzeit vertreten?
- F2: Welche Ein- und Ausschlusskriterien sind innerhalb der Literaturrecherche notwendig, um die Vollständigkeit der erhaltenen Suchergebnisse zu gewährleisten?

- F3: Wie können die ermittelten CM Methoden und Ansätze, der Hauptforschungsfrage entsprechend, angemessen klassifiziert beziehungsweise kategorisiert werden?
- F4: Wie kann die Kreislauffähigkeit der ermittelten CM Methoden und Ansätze auf Mikroebene bewertet werden?

Unter Verwendung der Methode der systematischen Literaturrecherche nach Tranfield et al. (2002) und bibliometrischen Analyse nach Aria & Cuccurullo (2017) konnte das Forschungsfeld systematisch aufgearbeitet werden (Kapitel 4). Ein wesentlicher Schritt innerhalb der SLR war, neben der Identifikation geeigneter Schlüsselwörter und Boolesche Operatoren, die Ermittlung adäquater Ein- und Ausschlusskriterien, um einer selektiven Auswahl an Literatur entgegenzuwirken. Auf Basis des Forschungsziels und basierend auf der Arbeit von Acerbi und Taisch (2020) wurden sechs Einschlusskriterien (EK1-EK6) und sieben Ausschlusskriterien (AK1-AK7) ausgewählt, die den Fokus der SLR auf CM Methoden und Ansätze (AK6 & AK7) im Maschinenbausektor (AK3-AK5) unter Ausschluss des organischen Kreislaufs (AK1 & AK2) legen und die Vollständigkeit der erhaltenen Ergebnisse (EK1-EK6) gewährleisten. Damit kann **Forschungsfrage F2** beantwortet werden.

Ausgehend von 548 Publikationen, die sich aus der Sucheingabe unter Einbezug der Einschlusskriterien ergaben, konnten durch das iterative Ausschlussverfahren insgesamt 47 CM Methoden und Ansätze identifiziert werden, die gemäß aktuellem Stand der Forschung im Maschinenbausektor derzeit vertreten sind (**Forschungsfrage F1**). Neben klassischen Lean-Methoden wie der Wertstromanalyse, werden aktuell zudem eine Vielzahl an unterschiedlichen Industrie 4.0 (I4.0) Technologien, darunter Cloud Manufacturing, Digital Twin, IoT, AI, VR, Block-Chain genutzt, um zirkuläre Wertschöpfung auf Mikroebene einzuführen. Eine vollständige Auflistung und Beschreibung aller Methoden und Ansätze ist Kapitel 4.3 zu entnehmen.

Zur angemessenen Aufbereitung der Ergebnisse wird in Kapitel 4.1 auf Basis der deskriptiven Analyse, sowie der Definition der Kreislaufwirtschaft nach Kirchherr et al. (2017) ein Kodierungsrahmenwerk entwickelt. Dieses ermöglicht eine Klassifizierung und Kategorisierung der CM Methoden und Ansätze und trägt damit zur Beantwortung der **Forschungsfrage F3** bei. Unter Zuhilfenahme des Kodierungsrahmenwerks innerhalb der thematischen Analyse nur eine aktuelle Forschungslücke im Bereich soziale Nachhaltigkeit identifiziert werden, sondern zudem ein Überblick über aktuelle Anwendungsfelder („Entscheidungsfindung“, „Physische Implementierung“ und „Bewertung und Überwachung der Zirkularität“) der Methoden gegeben werden.

Angesichts der inhärenten Komplexität von zirkulären Systemen wird in der Forschung zur Bewertung von Kreislaufwirtschaftsstrategien aktuell die Methode der

multikriteriellen Entscheidungsfindung (MCDM) priorisiert, vgl. Shen et al. (2013), Sassanelli et al. (2019), Garcia-Bernabeu et al. (2020) und Alamerew und Brissaud (2019). Dieser Tatsache zugrunde liegend wurde die MCDM herangezogen, um die Kreislauffähigkeit der in Kapitel 4 ermittelten CM Methoden und Ansätze zu bewerten und damit **Forschungsfrage F4** zu adressieren. Die Auswahl geeigneter MCDM-Techniken wird begründet durch die SLR von dos Santos Gonçalves and Campos (2022). Da sich, gemäß aktuellem Stand der Technik, noch kein Werk mit der Bewertung der Kreislauffähigkeit von CM Methoden und Ansätzen auseinandergesetzt hat, wurden die verwendeten Kriterien einer Validierung unterzogen.

Damit konnten alle vier Forschungsfragen vollständig beantwortet werden und das Hauptziel der Arbeit, derzeit verwendete Methoden und Ansätze zur Einführung zirkulärer Wertschöpfung zu ermitteln und diese kritisch zu durchleuchten, ist als erfüllt zu betrachten. Untergeordnet wurde dadurch ein Beitrag zur Grundlagenforschung im Bereich Kreislaufwirtschaft geleistet.

7.2 Limitationen und Ausblick

Bei der Durchführung einer systematischen Literaturrecherche besteht das Risiko, dass der wissenschaftliche Hintergrund, der Standpunkt und Ansichten der Wissenschaftler:innen, Einfluss auf die Datenauswahl und -analyse nimmt. Um dem vorzubeugen, wurde innerhalb dieser Arbeit versucht, durch die Entwicklung eindeutiger Ein- und Ausschlusskriterien einen Bezugsrahmen mit spezifischen und neutralen Bewertungspunkten zu entwickeln. Der entwickelte Kodierungsrahmen und das vorgestellte Forschungsprotokoll wurden zur übersichtlichen Aufbereitung der Ergebnisse verwendet und dienen dazu, den Fokus zu wahren. Trotz dieser vorbeugenden Maßnahmen besteht jedoch immer ein Restrisiko, dass subjektive Eindrücke des Rechercheurs die Forschungsergebnisse beeinflussen.

Um die Arbeit in einem überschaubaren Rahmen zu halten, wurde das Ausmaß des Forschungsvorhabens, durch die Setzung von Forschungsschwerpunkten, gewissermaßen beschränkt. So sind die identifizierten Methoden und Ansätze zur Einführung zirkulärer Wertschöpfung auf die Mikroebene, den Maschinenbausektor, sowie den technischen Kreislauf limitiert. Da es sich bei der Kreislaufwirtschaft um ein ganzheitliches Konzept handelt, das nicht auf diese Themenschwerpunkte beschränkt werden kann und soll, bedarf es zukünftig einer Ausweitung der Forschung auf die Meso- und Makroebene, auf andere Sektoren bzw. auf den organischen Kreislauf.

In Anbetracht des Risikos, nur Erfolgsgeschichten zu beschreiben und aufzuzeigen, sind Forschungsbemühungen, die sich darauf fokussieren aus Misserfolgen zu lernen, zu begrüßen. In Bezug auf die systematische Literaturrecherche könnte die Ausweitung mit Hilfe anderer Datenbanken, beispielsweise der Web of Science (WOS) Datenbank, oder eine Erweiterung der verwendeten Schlüsselwörter dienlich sein, um

mögliche Anwendungsbereiche der CM Methoden und Ansätze weiter zu detaillieren. Zur Identifikation neuer Schlüsselwörter könnte das vorgestellte Schlüsselwort-Koinzidenznetzwerk innerhalb der deskriptiven Analyse, vgl. Kapitel 4.2, dienen. Zudem sind Untersuchungen, die sich mit den Auswirkungen der CM Methoden und Ansätze beschäftigen, sehr zu befürworten.

Wie die Untersuchung der CM-Methoden und Ansätze innerhalb der SLR zeigt, wird die soziale Dimension überwiegend vernachlässigt. Künftige Arbeiten sollten deshalb versuchen, Zusammenhänge zwischen sozialen, ökonomischen und ökologischen Aspekten zu knüpfen.

Obwohl produzierende Unternehmen auf den ersten Blick nur eine kleine Rolle im Lebenszyklus des Produktes nehmen, weist Bjørnbet et al. (2021) darauf hin, dass durch Produktentwicklung und -design die Nutzung und Lebensdauer eines Produkts erheblich beeinflusst werden kann, weshalb die Industrie eine Schlüsselrolle in allen weiterführenden Forschungsvorhaben einnehmen sollte.

8 Anhang

Schlüsselwörter (Top 50)

Tree



Fragebogen Validierung

Multi-Criteria Decision Making Validierung der identifizierten Kriterien

1. Identifikation adäquater Kriterien

1.1. Theoretischer Hintergrund MCDM

Während klassische Modelle zur Entscheidungsfindung häufig ausschließlich eine Zielgröße berücksichtigen, können mit der Methode der multikriteriellen Entscheidungsunterstützung, engl. Multicriteria Decision-Making (MCDM), eine Vielzahl an Kriterien aus den unterschiedlichsten Bereichen einbezogen werden (Ahmed et al., 2022; dos Santos Gonçalves and Campos, 2022; Stankevičienė and Nikanorova, 2020). Ausgehend von der jeweiligen Problemstellung und Zielsetzung ergeben sich unterschiedliche potenzielle Handlungsoptionen (Alternativen). Zur Identifikation möglicher Kriterien empfiehlt sich die Aufschlüsselung der obersten Zielsetzung in unterschiedliche Zielsysteme. Auf Basis der festgelegten Zielsysteme erfolgt die Identifikation relevanter Kriterien (Ahmed et al., 2022; Geldermann and Lerche, 2014). Für die Darstellung struktureller Zusammenhänge zwischen Zielsystem und Kriterium kann eine Kriterienhierarchie herangezogen werden. Innerhalb dieser Hierarchie findet eine Unterteilung in Oberstes Ziel, Zielsysteme, Kriterien und Maßeinheit statt, vgl. Abbildung 1. Zunächst wird ein grobes Oberstes Ziel definiert, welches über die Zuordnung von verbundenen Unterzielen (Zielsystemen) aufgeschlüsselt wird. Für jedes Unterziel werden danach entscheidungsrelevante Kriterien formuliert, denen im Anschluss darauf ein messbares Attribut zugewiesen wird (Geldermann and Lerche, 2014).

1.2. Beschreibung des Identifikationsprozess

Ziel der Diplomarbeit ist es derzeit verwendete Methoden und Ansätze zur Einführung zirkulärer Wertschöpfung in Produktionsunternehmen zu ermitteln und diese kritisch zu durchleuchten. Das Forschungsvorhaben soll sich dabei auf den technischen Kreislauf, sowie einem Umsetzungsausmaß auf Mikroebene beschränken und den Fokus primär auf produzierende Unternehmen im Maschinenbausektor legen. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wird weiterführend die Einführung zirkulärer Wertschöpfung auf Produktionsebene, mit den englischen Begriff „Circular Manufacturing (CM)“ abgekürzt.

Die Zielsetzung der Multi-Criteria Decision Making (MCDM) Methode spiegelt sich in Forschungsfrage 4 wider.

F4: Wie kann die Kreislauffähigkeit der ermittelten CM Methoden und Ansätze bewertet werden?

Auf Basis dessen wird das oberste Ziel der MCDM Methode wie folgt definiert. In der Kriterienhierarchie wird dieses Ziel mit „Kreislauffähigkeit“ abgekürzt.

Kreislauffähigkeit der ermittelten CM Methoden und Ansätze bewerten

Auf Basis dessen werden unterschiedliche Zielsysteme festgelegt, die primär zwei Anforderungen erfüllen müssen. Einerseits muss die Messbarkeit der Zielsysteme bzw. in weiterer Folge der Kriterien gewährleistet sein und andererseits durch sie eine sinnvolle Bewertung der Kreislauffähigkeit ermöglicht werden. Es konnten folgende fünf Zielsysteme bzw. sieben Kriterien identifiziert werden.

Einen Überblick über alle Zielsysteme und Kriterien finden sich in Abbildung 1.

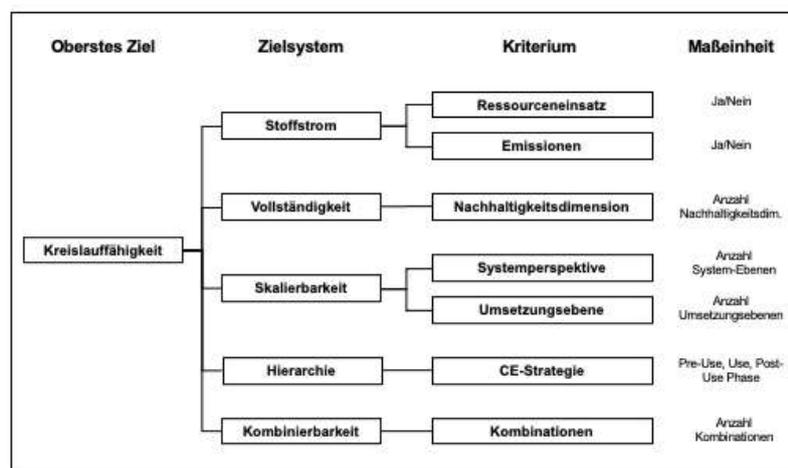


Abbildung 1: Kriterienhierarchie bei der Bewertung der Kreislauffähigkeit von CM-Methoden und Ansätze

(1) Stoffstrom

Das Konzept der Kreislaufwirtschaft (Circular Economy, kurz CE) kann als eine Operationalisierung für Unternehmen zur Umsetzung des Konzepts der nachhaltigen Entwicklung angesehen werden, und visiert damit eine absolute Reduktion der physischen Stoffströme an (Ghisellini et al., 2016; Murray et al., 2017; OECD, 2016; UNEP, 2011).

Auf Basis dessen ist auch innerhalb der ermittelten CM-Methoden, Tools, Technologien davon auszugehen, dass jene die bei ihrer Herstellung bzw. Gebrauch wenig Ressourcen verbrauchen und kaum zusätzliche Emissionen freigesetzt werden zu bevorzugen sind.

Beispiel: Die klassische Wertstromanalyse, ist eine Methode zur Identifizierung nicht wertschöpfender Prozesse. Außer Stift und Papier die zur Aufnahme des ganzheitlichen Wertschöpfungsprozess benötigt werden, werden kaum weitere Ressourcen aufgewendet. Dahingehen werden beim Einsatz von Industrie 4.0 (I4.0) Technologien (BSP: Sensoren), zur Identifizierung von nicht wertschöpfenden Prozessen, sowohl bei der Herstellung der Technologie (Materialaufwand) als auch während dem Gebrauch (Energie) Ressourcen aufgewendet und Emissionen freigesetzt. Deshalb ist die Wertstromanalyse gegenüber I4.0 Technologien aus Hinsicht der Stoffströme zu präferieren.

Diese Tatsache wird im Zielsystem „**Stoffstrom**“ mit den Kriterien „**Ressourceneinsatz**“ und „**Emissionen**“ abgebildet. Da nicht bei jeder Methode/Tool/Technologie der exakte Ressourceneinsatz bzw. die ausgestoßenen Emissionen messbar sind, beschränkt sich die Maßeinheit beider Kriterien auf „Ja/Nein“. „Nein“ wird verwendet, wenn kaum Ressourcen verbraucht und Schadstoffe emittiert werden (BSP: Wertstromanalyse), „Ja“ wenn davon auszugehen ist, dass das Kriterium erfüllt ist (BSP: I4.0 Technologie).

(2) Vollständigkeit

Das Drei-Säulen-Modell der nachhaltigen Entwicklung geht davon aus, dass nachhaltige Entwicklung nur durch das gleichzeitige und gleichberechtigte Umsetzen von ökologischen, ökonomischen und sozialen Zielen erreicht werden kann. Nicht nur Kirchherr et al. (2017) greift in seinen Kodierungsrahmen zur Definition des Kreislaufwirtschaftsbegriffs alle drei Dimensionen auf, sondern auch Autoren wie Acerbi and Taisch (2020) oder Ávila-Gutiérrez et al. (2020), die sich in ihren Werken mit der Kategorisierung von CE Strategien auseinandersetzen (Acerbi and Taisch, 2020; Ávila-Gutiérrez et al., 2020; Kirchherr et al., 2017). Innerhalb des Konzept der Kreislaufwirtschaft wird ebenfalls die gleichzeitige und gleichberechtigte Umsetzung aller drei Nachhaltigkeitsdimensionen wiederholt betont (Kirchherr et al., 2017).

Dieser Tatsache zugrunde liegend, ist auch bei der Bewertung der Kreislauffähigkeit davon auszugehen, dass Methoden/Tools/Technologien die gleichzeitig mehrere Nachhaltigkeitsdimensionen oder im besten Fall alle drei Dimensionen vollständig adressieren, jenen die nur eine adressieren vorzuziehen sind. Innerhalb des Zielsystem „**Vollständigkeit**“ wird deshalb das Kriterium „**Nachhaltigkeitsdimension**“ eingeführt, dass mit Hilfe der Maßeinheit „Anzahl an adressierten Nachhaltigkeitsdimensionen“ gemessen wird.

(3) Skalierbarkeit

Das Zielsystem „**Skalierbarkeit**“ wird mit Hilfe von zwei Kriterien („Systemperspektive“ und „Zielsetzung“) abgebildet.

Die Systemperspektive wurde ebenfalls von Kirchherr et al. (2017), Acerbi and Taisch (2020) und Ávila-Gutiérrez et al. (2020) aufgegriffen und spielt in der Publikation von Sitadewi et al. (2021) und Lim et al. (2022) eine essenzielle Rolle bei der Einteilung der CE Prinzipien (Acerbi and Taisch, 2020; Ávila-Gutiérrez et al., 2020; Kirchherr et al., 2017; Lim et al., 2022; Sitadewi et al., 2021). Eine Vielzahl an Autoren, darunter Sakr et al. (2011) und Jackson et al. (2014) argumentieren, dass der Übergang zur Kreislaufwirtschaft auf drei Ebenen zu erfolgen hat, welche als die drei Ebenen des CE-System interpretiert werden können: Die Makro-, Meso- und Mikroebene. Während innerhalb der Makrosystem-Perspektive die Notwendigkeit hervorgehoben wird, die industrielle Struktur und Zusammensetzung der gesamten Wirtschaft zu verändern, legt die Perspektive des Mesosystems den Fokus auf Öko-Industrieparks als System. Okkasionell wird die Makroebene auch als „nationale/globale Ebene“, die Mesoebene als „regionale Ebene“ bezeichnet, vgl. Li et al. (2010) oder Geng et al. (2009). Dagegen betrachtet die Mikrosystem-Perspektive in der Regel Produkte bzw. einzelne Unternehmen und deren Konsumenten (Jackson et al., 2014; Kirchherr et al., 2017; Li et al., 2010; Sakr et al., 2011; Zhijun and Nailing, 2007).

Unter dem Kriterium „**Systemperspektive**“ wird die Fähigkeit der CM-Methode verstanden, sich für den Einsatz auf unterschiedlichen Ebenen des CE-Systems zu eignen. Auf Basis der einleitend erwähnten Werke ist davon auszugehen, dass eine CM Methode/Tool/Technologie die gewissermaßen skalierbar ist und sich für den Einsatz auf mehr als einer Ebene des CE-System eignet, gegenüber jener die nur eine Ebene adressiert, zu präferieren ist (Maßeinheit: Anzahl an adressierten System-Ebenen).

Innerhalb der systematischen Literaturrecherche (SLR) (Forschungsfrage F1) kristallisierten sich drei unterschiedliche Forschungsströme zur Einführung zirkulärer Wertschöpfung in Produktionsunternehmen heraus. Die identifizierten Methoden/Tools bzw. Technologien werden auf unterschiedlichen Umsetzungsebenen eingesetzt, die sich in drei Kategorien unterteilen lassen: „Entscheidungsfindung“, „Physische Implementierung“ und „Bewertung & Überwachung der Zirkularität“. Diese Erkenntnis deckt sich auch mit den von Acerbi and Taisch (2020) publizierten Paper.

Im Kriterium „**Umsetzungsebene**“ wird, auf gleicher Argumentationsbasis wie beim vorhergehenden Kriterium, ebenfalls davon ausgegangen, dass jene Methoden/Tools/Technologien, die auf unterschiedlichen Umsetzungsebenen eingesetzt werden können, besser skalierbar und deshalb zu bevorzugen sind (Maßeinheit: Anzahl an adressierten Umsetzungsebenen).

(4) Hierarchie

In Einklang mit dem Werk von (Kirchherr et al., 2017) erfolgte innerhalb der SLR eine Zuordnung der CE Methoden/Tools/Technologien zu den unterschiedlichen Phasen („Pre-Use“, „Use“ und „Post-Use“ Phase). Während sich die Pre-Use Phase mit der intelligenten Nutzung und Herstellung von Produkten und Infrastruktur beschäftigt, Stichwort Refuse, Rethink und Reduce, beschäftigen sich Methoden und Ansätze, die der Use-Phase zugeordnet werden, mit Lebensdauermaximierung von Produkten, Komponenten und Infrastruktur (Reuse, Repair, Refurbish, Remanufacture, Repurpose). Die Post-Use Phase deckt alle Methoden und Ansätze ab, bei denen eine Wiederverwertung von Materialien zurückgegriffen wird. Die Reihenfolge der Phasen folgt dabei einer Hierarchie, demzufolge die erste Phase der zweiten und die Zweite der Dritten zu priorisieren ist, vgl. (Charter and Tischner, 2017; Kirchherr et al., 2017; McDonough and Braungart, 2002).

Diese Tatsache wird mit Hilfe des Zielsystem „**Hierarchie**“ unter Verwendung des Kriteriums „**CE-Strategie**“ abgebildet. Dazu werden die Methoden/Tools/Technologien je nachdem welcher Phase sie zugeordnet werden können bewertet (Maßeinheit: „Pre-Use“ = höchster Wert, „Use“ = mittlerer Wert, „Post-Use“ = niedrigster Wert).

(5) Kombinierbarkeit

Während der SLR hat sich gezeigt, dass einige der CE-Methoden/Tools/Technologien in der Literatur häufiger miteinander kombiniert werden als andere. Ein Paradebeispiel dafür ist die Methode des Life Cycle Assessment (LCA). So verbinden Abbate et al. (2022) und Gouveia et al. (2022) LCA mit LCC, García-Muina et al. (2021) mit I4.0 Technologien, Niero und Kalbar (2019) mit MCDM, Scheepens et al. (2016) und Chen und Huang (2019) mit PSS und Martínez-Cámara et al. (2021) mit Eco-Design (Abbate et al., 2022; Chen and Huang, 2019; García-Muina et al., 2021; Gouveia et al., 2022; Martínez-Cámara et al., 2021; Niero and Kalbar, 2019; Scheepens et al., 2016).

Als letztes Kriterium wird deshalb „**Kombinationen**“ eingeführt, das die „**Kombinierbarkeit**“ der einzelnen CE-Methoden/Tools/Technologien widerspiegelt (Maßeinheit: Anzahl an möglichen Kombinationen).

2. Fragebogen

Aufgabenstellung: Kreuzen Sie die für Sie zutreffende Auswahlmöglichkeit an. Es ist maximal eine Auswahlmöglichkeit pro Frage anzukreuzen.

(1) Das Kriterium „Ressourceneinsatz“ ist meiner Meinung nach ..., um die Kreislauffähigkeit der Methode/ des Tools/ der Technologie bewerten zu können.

essenziell *nützlich, aber nicht essenziell* *nicht notwendig*

(2) Das Kriterium „Emissionen“ ist meiner Meinung nach ..., um die Kreislauffähigkeit der Methode/ des Tools/ der Technologie bewerten zu können.

essenziell *nützlich, aber nicht essenziell* *nicht notwendig*

(3) Das Kriterium „Nachhaltigkeitsdimension“ ist meiner Meinung nach ..., um die Kreislauffähigkeit der Methode/ des Tools/ der Technologie bewerten zu können.

essenziell *nützlich, aber nicht essenziell* *nicht notwendig*

(4) Das Kriterium „Systemperspektive“ ist meiner Meinung nach ..., um die Kreislauffähigkeit der Methode/ des Tools/ der Technologie bewerten zu können.

essenziell *nützlich, aber nicht essenziell* *nicht notwendig*

(5) Das Kriterium „Umsetzungsebene“ ist meiner Meinung nach ..., um die Kreislauffähigkeit der Methode/ des Tools/ der Technologie bewerten zu können.

essenziell *nützlich, aber nicht essenziell* *nicht notwendig*

(6) Das Kriterium „CE-Strategie“ ist meiner Meinung nach ..., um die Kreislauffähigkeit der Methode/ des Tools/ der Technologie bewerten zu können.

essenziell nützlich, aber nicht essenziell nicht notwendig

(7) Das Kriterium „Kombinationen“ ist meiner Meinung nach ..., um die Kreislauffähigkeit der Methode/ des Tools/ der Technologie bewerten zu können.

essenziell nützlich, aber nicht essenziell nicht notwendig

Aufgabenstellung: Wählen Sie einen der beiden Antwortmöglichkeiten aus und beantworten Sie gegebenenfalls die offene Frage.

(8) Die sieben Kategorien eignen sich meiner Meinung nach, um die Kreislauffähigkeit der CM-Methoden und Ansätze bewerten zu können.

zutreffend nicht zutreffend

Falls Sie „nicht zutreffend“ ausgewählt haben führen Sie bitte an, welches Kriterium bzw. welche Kriterien sich Ihrer Meinung nach noch nicht eignen und warum:

(9) Die sieben Kategorien reichen meiner Meinung nach aus, um die Kreislauffähigkeit der CM-Methoden und Ansätze hinreichend bewerten zu können.

zutreffend

nicht zutreffend

Falls Sie „nicht zutreffend“ ausgewählt haben führen Sie bitte an, welches Kriterium bzw. welche Kriterien Ihrer Meinung nach noch abgängig ist / sind:

(10) Es wurde ausführlich begründet, warum die jeweiligen Kriterien herangezogen wurden.

zutreffend

nicht zutreffend

Falls Sie „nicht zutreffend“ ausgewählt haben führen Sie bitte an, bei welchem Kriterium bzw. welchen Kriterien Ihrer Meinung nach die Begründung nicht ausreichend ist und warum:

Literaturverzeichnis

- Abbate, E., Mirpourian, M., Brondi, C., Ballarino, A., Copani, G., 2022. Environmental and Economic Assessment of Repairable Carbon-Fiber-Reinforced Polymers in Circular Economy Perspective. *Materials* 15, 2986. <https://doi.org/10.3390/ma15092986>
- Acerbi, F., Taisch, M., 2020. A literature review on circular economy adoption in the manufacturing sector. *J. Clean. Prod.* 273, 123086. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123086>
- Ahmed, A.A., Nazzal, M.A., Darras, B.M., Deiab, I.M., 2022. A comprehensive multi-level circular economy assessment framework. *Sustain. Prod. Consum.* 32, 700–717. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2022.05.025>
- Ávila-Gutiérrez, M.J., Martín-Gómez, A., Aguayo-González, F., Lama-Ruiz, J.R., 2020. Eco-Holonic 4.0 Circular Business Model to Conceptualize Sustainable Value Chain towards Digital Transition. *Sustainability* 12, 1889. <https://doi.org/10.3390/su12051889>
- Charter, M., Tischner, U., 2017. *Sustainable Solutions: Developing Products and Services for the Future*. Routledge.
- Chen, Z., Huang, L., 2019. Application review of LCA (Life Cycle Assessment) in circular economy: From the perspective of PSS (Product Service System). *Procedia CIRP* 83, 210–217. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.04.141>
- dos Santos Gonçalves, P.V., Campos, L.M.S., 2022. A systemic review for measuring circular economy with multi-criteria methods. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 29, 31597–31611. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-18580-w>
- García-Muñiña, F., Medina-Salgado, M.S., González-Sánchez, R., Huertas-Valdivia, I., Ferrari, A.M., Settembre-Blundo, D., 2021. Industry 4.0-based dynamic Social Organizational Life Cycle Assessment to target the social circular economy in manufacturing. *J. Clean. Prod.* 327, 129439. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129439>
- Geldermann, J., Lerche, N., 2014. *Leitfaden zur Anwendung von Methoden der multi-kriteriellen Entscheidungsunterstützung*. Georg-August-Universität Göttingen.
- Ghisellini, P., Cialani, C., Ulgiati, S., 2016. A review on circular economy: the expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems. *J. Clean. Prod., Towards Post Fossil Carbon Societies: Regenerative and Preventative Eco-Industrial Development* 114, 11–32. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.007>
- Gouveia, J.R., Pinto, S.M., Campos, S., Matos, J.R., Sobral, J., Esteves, S., Oliveira, L., 2022. Life Cycle Assessment and Cost Analysis of Additive Manufacturing Repair Processes in the Mold Industry. *Sustainability* 14, 2105. <https://doi.org/10.3390/su14042105>
- Jackson, M., Lederwasch, A., Giurco, D., 2014. Transitions in Theory and Practice: Managing Metals in the Circular Economy. *Resources* 3, 516–543. <https://doi.org/10.3390/resources3030516>
- Kirchherr, J., Reike, D., Hekkert, M., 2017. Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. *Resour. Conserv. Recycl.* 127, 221–232. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.005>
- Li, H., Bao, W., Xiu, C., Zhang, Y., Xu, H., 2010. Energy conservation and circular economy in China's process industries. *Energy, Energy and Its Sustainable*

- Development for China 35, 4273–4281.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2009.04.021>
- Lim, M.K., Lai, M., Wang, C., Lee, S.Y., 2022. Circular economy to ensure production operational sustainability: A green-lean approach. *Sustain. Prod. Consum.* 30, 130–144. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.12.001>
- Martínez-Cámara, E., Santamaría, J., Sanz-Adán, F., Arancón, D., 2021. Digital Eco-Design and Life Cycle Assessment—Key Elements in a Circular Economy: A Case Study of a Conventional Desk. *Appl. Sci.* 11, 10439.
<https://doi.org/10.3390/app112110439>
- McDonough, W., Braungart, M., 2002. *Cradle to Cradle: Remaking the Way We Make Things*, 1st ed. Macmillan USA, New York.
- Murray, A., Skene, K., Haynes, K., 2017. The Circular Economy: An Interdisciplinary Exploration of the Concept and Application in a Global Context. *J. Bus. Ethics* 140, 369–380. <https://doi.org/10.1007/s10551-015-2693-2>
- Niero, M., Kalbar, P.P., 2019. Coupling material circularity indicators and life cycle based indicators: A proposal to advance the assessment of circular economy strategies at the product level. *Resour. Conserv. Recycl.* 140, 305–312.
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.10.002>
- OECD, 2016. *Farm Management Practices to Foster Green Growth*.
- Sakr, D., Baas, L., El-Haggar, S., Huisingh, D., 2011. Critical success and limiting factors for eco-industrial parks: global trends and Egyptian context. *J. Clean. Prod.* 19, 1158–1169. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.01.001>
- Scheepens, A.E., Vogtländer, J.G., Brezet, J.C., 2016. Two life cycle assessment (LCA) based methods to analyse and design complex (regional) circular economy systems. Case: making water tourism more sustainable. *J. Clean. Prod., Towards Post Fossil Carbon Societies: Regenerative and Preventative Eco-Industrial Development* 114, 257–268.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.05.075>
- Sitadewi, D., Yudoko, G., Okdinawati, L., 2021. Bibliographic mapping of post-consumer plastic waste based on hierarchical circular principles across the system perspective. *Heliyon* 7, e07154.
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e07154>
- Stankevičienė, J., Nikanorova, M., 2020. ECO-INNOVATION AS A PILLAR FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT OF CIRCULAR ECONOMY. *Bus. Theory Pract.* 21, 531–544. <https://doi.org/10.3846/btp.2020.12963>
- UNEP, 2011. *Towards a Green Economy: Pathways to Sustainable Development and Poverty Eradication*.
- Zhijun, F., Nailing, Y., 2007. Putting a circular economy into practice in China. *Sustain. Sci.* 2, 95–101. <https://doi.org/10.1007/s11625-006-0018-1>

9 Literaturverzeichnis

Abbate, E., Mirpourian, M., Brondi, C., Ballarino, A., Copani, G., 2022. Environmental and Economic Assessment of Repairable Carbon-Fiber-Reinforced Polymers in Circular Economy Perspective. *Materials* 15, 2986. <https://doi.org/10.3390/ma15092986>

Abideen, A., Mohamad, F.B., 2020. Improving the performance of a Malaysian pharmaceutical warehouse supply chain by integrating value stream mapping and discrete event simulation. *J. Model. Manag.* 16, 70–102. <https://doi.org/10.1108/JM2-07-2019-0159>

Abideen, A.Z., Mohamad, F.B., Fernando, Y., 2020. Lean simulations in production and operations management – a systematic literature review and bibliometric analysis. *J. Model. Manag.* 16, 623–650. <https://doi.org/10.1108/JM2-05-2019-0103>

Abideen, A.Z., Pyeman, J., Sundram, V.P.K., Tseng, M.-L., Sorooshian, S., 2021. Leveraging Capabilities of Technology into a Circular Supply Chain to Build Circular Business Models: A State-of-the-Art Systematic Review. *Sustainability* 13, 8997. <https://doi.org/10.3390/su13168997>

Acerbi, F., Taisch, M., 2020. A literature review on circular economy adoption in the manufacturing sector. *J. Clean. Prod.* 273, 123086. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123086>

Agrawal, R., Wankhede, V.A., Kumar, A., Upadhyay, A., Garza-Reyes, J.A., 2022. Nexus of circular economy and sustainable business performance in the era of digitalization. *Int. J. Product. Perform. Manag.* 71, 748–774. <https://doi.org/10.1108/IJPPM-12-2020-0676>

Ahmed, A.A., Nazzal, M.A., Darras, B.M., Deiab, I.M., 2022. A comprehensive multi-level circular economy assessment framework. *Sustain. Prod. Consum.* 32, 700–717. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2022.05.025>

Ajwani-Ramchandani, R., Figueira, S., Torres de Oliveira, R., Jha, S., Ramchandani, A., Schuricht, L., 2021. Towards a circular economy for packaging waste by using new technologies: The case of large multinationals in emerging economies. *J. Clean. Prod.* 281, 125139. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125139>

Alamerew, Y.A., Brissaud, D., 2019. Circular economy assessment tool for end of life product recovery strategies. *J. Remanufacturing* 9, 169–185. <https://doi.org/10.1007/s13243-018-0064-8>

Annan, K., 2004. Wir, die Völker: Die Rolle der Vereinten Nationen im 21. Jahrhundert, in: Fröhlich, M. (Ed.), *Die Vereinten Nationen im 21. Jahrhundert*. VS Verlag für Sozialwissenschaften, Wiesbaden, pp. 201–229. https://doi.org/10.1007/978-3-322-80439-6_21

Arena, M., Duque Ciceri, N., Terzi, S., Bengo, I., Azzone, G., Garetti, M., 2009. A state-of-the-art of industrial sustainability: Definitions, tools and metrics. *Int. J. Prod. Lifecycle Manag.* 4. <https://doi.org/10.1504/IJPLM.2009.031674>

Aria, M., Cuccurullo, C., 2017. Bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis. *J. Informetr.* 11, 959–975. <https://doi.org/10.1016/j.joi.2017.08.007>

Asiedu, Y., Gu, P., 1998. Product life cycle cost analysis: State of the art review. *Int. J. Prod. Res.* 36, 883–908. <https://doi.org/10.1080/002075498193444>

Asif, F.M.A., Roci, M., Lieder, M., Rashid, A., Mihelič, A., Kotnik, S., 2021. A methodological approach to design products for multiple lifecycles in the context of circular manufacturing systems. *J. Clean. Prod.* 296, 126534. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126534>

Ávila-Gutiérrez, M.J., Martín-Gómez, A., Aguayo-González, F., Lama-Ruiz, J.R., 2020. Eco-Holonic 4.0 Circular Business Model to Conceptualize Sustainable Value Chain towards Digital Transition. *Sustainability* 12, 1889. <https://doi.org/10.3390/su12051889>

Azarenko, A., Roy, R., Shehab, E., Tiwari, A., 2009. Technical product-service systems: some implications for the machine tool industry. *J. Manuf. Technol. Manag.* 20, 700–722. <https://doi.org/10.1108/17410380910961064>

Baazouzi, S., Rist, F.P., Weeber, M., Birke, K.P., 2021. Optimization of Disassembly Strategies for Electric Vehicle Batteries. *Batteries* 7, 74. <https://doi.org/10.3390/batteries7040074>

Bagalagel, S., ElMaraghy, W., 2021. Hybrid decision-making and optimisation framework for manufacturing-remanufacturing closed loop systems. *Int. J. Sustain. Eng.* 14, 1396–1410. <https://doi.org/10.1080/19397038.2021.2000063>

Battisti, David.S., Naylor, R.L., 2009. Historical Warnings of Future Food Insecurity with Unprecedented Seasonal Heat. *Science* 323, 240–244. <https://doi.org/10.1126/science.1164363>

Bengtsson, M., Kurdve, M., 2016. Machining Equipment Life Cycle Costing Model with Dynamic Maintenance Cost. *Procedia CIRP, The 23rd CIRP Conference on Life Cycle Engineering* 48, 102–107. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.03.110>

Bilharz, M., 2006. Nachhaltiger Konsum als strukturpolitisches Instrument der Verbraucherpolitik: Endbericht. Technische Universität München, Freising.

Bjørnbet, M.M., Skaar, C., Fet, A.M., Schulte, K.Ø., 2021. Circular economy in manufacturing companies: A review of case study literature. *J. Clean. Prod.* 294, 126268. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126268>

Bjørnbet, M.M., Vildåsen, S.S., 2021. Life Cycle Assessment to Ensure Sustainability of Circular Business Models in Manufacturing. *Sustainability* 13, 11014. <https://doi.org/10.3390/su131911014>

Blunck, E., Werthmann, H., 2017. INDUSTRY 4.0 – AN OPPORTUNITY TO REALIZE SUSTAINABLE MANUFACTURING AND ITS POTENTIAL FOR A CIRCULAR ECONOMY. *DIEM Dubrov. Int. Econ. Meet.* 3, 644–666.

BMK, 2021. Die österreichische Kreislaufwirtschaft: Österreich auf dem Weg zu einer nachhaltigen und zirkulären Gesellschaft.

BMK, 2020. Ressourcennutzung in Österreich 2020 (No. Band 3). Wien.

Bocken, N., Short, S., Rana, P., Evans, S., 2013. A value mapping tool for sustainable business modelling. *Corp. Gov.* 13, 482–497. <https://doi.org/10.1108/CG-06-2013-0078>

Booth, A., Sutton, A., Clowes, M., James, M.M.-S., 2021. *Systematic Approaches to a Successful Literature Review*. SAGE.

Bourque, L.B., 2004. Coding frame. *The SAGE Encyclopedia of Social Science Research Methods*. SAGE Publications, United States.

- Bressanelli, G., Adrodegari, F., Perona, M., Saccani, N., 2018a. Exploring How Usage-Focused Business Models Enable Circular Economy through Digital Technologies. *Sustainability* 10, 639. <https://doi.org/10.3390/su10030639>
- Bressanelli, G., Adrodegari, F., Perona, M., Saccani, N., 2018b. The role of digital technologies to overcome Circular Economy challenges in PSS Business Models: an exploratory case study. *Procedia CIRP*, 10th CIRP Conference on Industrial Product-Service Systems, IPS2 2018, 29-31 May 2018, Linköping, Sweden 73, 216–221. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.03.322>
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, 1992. Konferenz der Vereinten Nationen für Umwelt und Entwicklung im Juni 1992 in Rio de Janeiro 22–25.
- Charnley, F., Tiwari, D., Hutabarat, W., Moreno, M., Okorie, O., Tiwari, A., 2019. Simulation to Enable a Data-Driven Circular Economy. *Sustainability* 11, 3379. <https://doi.org/10.3390/su11123379>
- Charter, M., Tischner, U., 2017. *Sustainable Solutions: Developing Products and Services for the Future*. Routledge.
- Chen, Z., Huang, L., 2019. Application review of LCA (Life Cycle Assessment) in circular economy: From the perspective of PSS (Product Service System). *Procedia CIRP* 83, 210–217. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.04.141>
- Cioffi, R., Travaglioni, M., Piscitelli, G., Petrillo, A., Parmentola, A., 2020. Smart Manufacturing Systems and Applied Industrial Technologies for a Sustainable Industry: A Systematic Literature Review. *Appl. Sci.* 10, 2897. <https://doi.org/10.3390/app10082897>
- Daniyan, I., Mporu, K., Ramatsetse, B., 2020. The use of Analytical Hierarchy Process (AHP) decision model for materials and assembly method selection during railcar development. *Cogent Eng.* 7, 1833433. <https://doi.org/10.1080/23311916.2020.1833433>
- Daniyan, I., Mporu, K., Ramatsetse, B., Gupta, M., 2021. Review of life cycle models for enhancing machine tools sustainability: lessons, trends and future directions. *Heliyon* 7, e06790. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06790>
- Daozhong, C., Qingli, Z., Jie, W., Xiaozhi, Z., 2011. Comparative Analysis of Ecological Rucksack Between Open-pit and Underground Coal Mine. *Energy Procedia*, 2010 International Conference on Energy, Environment and Development - ICEED2010 5, 1116–1120. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2011.03.196>
- Deng, S., Zhou, X., Huang, A., Yih, Y., Sutherland, J.W., 2021. Evaluating economic opportunities for product recycling via the Sherwood principle and machine learning. *Resour. Conserv. Recycl.* 167, 105232. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105232>
- Desing, H., Braun, G., Hischer, R., 2021. Resource pressure – A circular design method. *Resour. Conserv. Recycl.* 164, 105179. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105179>
- Deutsches Umweltbundesamt, 2008. Kipp-Punkte im Klimasystem: Welche Gefahren drohen? 27.
- Dev, N.K., Shankar, R., Qaiser, F.H., 2020. Industry 4.0 and circular economy: Operational excellence for sustainable reverse supply chain performance. *Resour. Conserv. Recycl.* 153, 104583. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104583>
- Devaney, L., Henchion, M., 2018. Who is a Delphi 'expert'? Reflections on a bioeconomy expert selection procedure from Ireland. *Futures* 99, 45–55. <https://doi.org/10.1016/j.futures.2018.03.017>

- Díaz-Ramírez, M.C., Ferreira, V.J., García-Armingol, T., López-Sabirón, A.M., Ferreira, G., 2020. Battery Manufacturing Resource Assessment to Minimise Component Production Environmental Impacts. *Sustainability* 12, 6840. <https://doi.org/10.3390/su12176840>
- Dieterle, M., Schäfer, P., Viere, T., 2018. Life Cycle Gaps: Interpreting LCA Results with a Circular Economy Mindset. *Procedia CIRP*, 25th CIRP Life Cycle Engineering (LCE) Conference, 30 April – 2 May 2018, Copenhagen, Denmark 69, 764–768. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.11.058>
- Dominguez, S., Laso, J., Margallo, M., Aldaco, R., Rivero, M.J., Irabien, Á., Ortiz, I., 2018. LCA of greywater management within a water circular economy restorative thinking framework. *Sci. Total Environ.* 621, 1047–1056. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.10.122>
- dos Santos Gonçalves, P.V., Campos, L.M.S., 2022. A systemic review for measuring circular economy with multi-criteria methods. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 29, 31597–31611. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-18580-w>
- Du, Y., Yi, Q., Li, C., Liao, L., 2015. Life cycle oriented low-carbon operation models of machinery manufacturing industry. *J. Clean. Prod.* 91, 145–157. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.12.028>
- Ellen MacArthur Foundation, 2013. *Towards the circular economy: Economic and business rationale for an accelerated transition.*
- Ellsworth-Krebs, K., Rampen, C., Rogers, E., Dudley, L., Wishart, L., 2022. Circular economy infrastructure: Why we need track and trace for reusable packaging. *Sustain. Prod. Consum.* 29, 249–258. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.10.007>
- Elsbach, K.D., van Knippenberg, D., 2020. Creating High-Impact Literature Reviews: An Argument for 'Integrative Reviews.' *J. Manag. Stud.* 57, 1277–1289. <https://doi.org/10.1111/joms.12581>
- Emovon, I., Norman, R.A., Murphy, A.J., 2018. Hybrid MCDM based methodology for selecting the optimum maintenance strategy for ship machinery systems. *J. Intell. Manuf.* 29, 519–531. <https://doi.org/10.1007/s10845-015-1133-6>
- Enyoghasi, C., Badurdeen, F., 2021. Industry 4.0 for sustainable manufacturing: Opportunities at the product, process, and system levels. *Resour. Conserv. Recycl.* 166, 105362. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105362>
- Esmailian, B., Sarkis, J., Lewis, K., Behdad, S., 2020. Blockchain for the future of sustainable supply chain management in Industry 4.0.
- Europäische Kommission, 2019. *The European Green Deal: Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions (No. COM(2019) 640).* Brüssel.
- Evrard, D., Ben Rejeb, H., Zwolinski, P., Brissaud, D., 2021. Designing Immortal Products: A Lifecycle Scenario-Based Approach. *Sustainability* 13, 3574. <https://doi.org/10.3390/su13063574>
- Ferreira, I.A., Godina, R., Carvalho, H., 2020. Waste Valorization through Additive Manufacturing in an Industrial Symbiosis Setting. *Sustainability* 13, 234. <https://doi.org/10.3390/su13010234>
- Fink, A., 2010. *Conducting Research Literature Reviews: From the Internet to Paper.* SAGE.
- Fischer-Kowalski, M., Haberl, H., Hüttler, W., Payer, H., Schandl, H., Winiwarter, V., Zangerl-Weisz, H., 1997. *Gesellschaftlicher Stoffwechsel und Kolonisierung von Natur.* Fakultas Verlag, Amsterdam.

Fischer-Kowalski, M., Krausmann, F., Pallua, I., 2014. A sociometabolic reading of the Anthropocene: Modes of subsistence, population size and human impact on Earth. *Anthr. Rev.* 1, 8–33. <https://doi.org/10.1177/2053019613518033>

Fisher, O.J., Watson, N.J., Escrig, J.E., Gomes, R.L., 2020. Intelligent Resource Use to Deliver Waste Valorisation and Process Resilience in Manufacturing Environments: Moving towards sustainable process manufacturing. *Johns. Matthey Technol. Rev.* 64, 93–99. <https://doi.org/10.1595/205651320X15735483214878>

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. *Sustain. Prod. Consum.* 27, 1165–1182. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.02.017>

Frank, A.G., Dalenogare, L.S., Ayala, N.F., 2019. Industry 4.0 technologies: Implementation patterns in manufacturing companies. *Int. J. Prod. Econ.* 210, 15–26. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2019.01.004>

Garcia-Bernabeu, A., Hilario-Caballero, A., Pla-Santamaria, D., Salas-Molina, F., 2020. A Process Oriented MCDM Approach to Construct a Circular Economy Composite Index. *Sustainability* 12, 618. <https://doi.org/10.3390/su12020618>

García-Muiña, F., Medina-Salgado, M.S., González-Sánchez, R., Huertas-Valdivia, I., Ferrari, A.M., Settembre-Blundo, D., 2021. Industry 4.0-based dynamic Social Organizational Life Cycle Assessment to target the social circular economy in manufacturing. *J. Clean. Prod.* 327, 129439. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129439>

Garza-Reyes, J.A., Salomé Valls, A., Peter Nadeem, S., Anosike, A., Kumar, V., 2019. A circularity measurement toolkit for manufacturing SMEs. *Int. J. Prod. Res.* 57, 7319–7343. <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1559961>

Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N.M.P., Hultink, E.J., 2017. The Circular Economy – A new sustainability paradigm? *J. Clean. Prod.* 143, 757–768. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.048>

Geldermann, J., Lerche, N., 2014. Leitfaden zur Anwendung von Methoden der multi-kriteriellen Entscheidungsunterstützung. Georg-August-Universität Göttingen.

Ghisellini, P., Cialani, C., Ulgiati, S., 2016. A review on circular economy: the expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems. *J. Clean. Prod., Towards Post Fossil Carbon Societies: Regenerative and Preventative Eco-Industrial Development* 114, 11–32. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.007>

Gholami, H., Abu, F., Lee, J.K.Y., Karganroudi, S.S., Sharif, S., 2021. Sustainable Manufacturing 4.0—Pathways and Practices. *Sustainability* 13, 13956. <https://doi.org/10.3390/su132413956>

Giannarou, L., Zervas, E., 2014. Using Delphi technique to build consensus in practice. *Int J. Bus. Sci. Appl. Manag.* Volume 9, 18.

Gladek, E., 2019. The Seven Pillars of the Circular Economy. *Metabolic*. URL <https://www.metabolic.nl/news/the-seven-pillars-of-the-circular-economy/> (accessed 6.29.22).

Golinska-Dawson, P., Werner-Lewandowska, K., Kosacka-Olejnik, M., 2021. Responsible Resource Management in Remanufacturing—Framework for Qualitative Assessment in Small and Medium-Sized Enterprises. *Resources* 10, 19. <https://doi.org/10.3390/resources10020019>

- Goodall, P., Sharpe, R., West, A., 2019. A data-driven simulation to support remanufacturing operations. *Comput. Ind.* 105, 48–60. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2018.11.001>
- Gouveia, J.R., Pinto, S.M., Campos, S., Matos, J.R., Sobral, J., Esteves, S., Oliveira, L., 2022. Life Cycle Assessment and Cost Analysis of Additive Manufacturing Repair Processes in the Mold Industry. *Sustainability* 14, 2105. <https://doi.org/10.3390/su14042105>
- Grenz-Farenholtz, B., 2013. Systematische Literaturrecherche [WWW Document]. URL <https://docplayer.org/41971234-Systematische-literaturrecherche.html> (accessed 7.6.22).
- Gulati, G., Quigley, S., Murphy, V.E., Yacoub, E., Bogue, J., Kearns, A., O'Neill, C., Kelly, M., Morrison, A., Griffin, G., Blewitt, M., Fistein, E., Meagher, D., Dunne, C.P., 2018. A novel care pathway for prisoners with intellectual disability designed through a Delphi process. *Int. J. Prison. Health* 14, 276–286. <https://doi.org/10.1108/IJPH-08-2017-0037>
- Haber, N., Fargnoli, M., 2021. Sustainable Product-Service Systems Customization: A Case Study Research in the Medical Equipment Sector. *Sustainability* 13, 6624. <https://doi.org/10.3390/su13126624>
- Hashemi, A., Gholami, H., Venkatadri, U., Sattarpanah Karganroudi, S., Khouri, S., Wojciechowski, A., Streimikiene, D., 2022. A New Direct Coefficient-Based Heuristic Algorithm for Set Covering Problems. *Int. J. Fuzzy Syst.* 24, 1131–1147. <https://doi.org/10.1007/s40815-021-01208-5>
- Hedlund, C., Stenmark, P., Noaksson, E., Lilja, J., 2020. More value from fewer resources: how to expand value stream mapping with ideas from circular economy. *Int. J. Qual. Serv. Sci.* 12, 447–459. <https://doi.org/10.1108/IJQSS-05-2019-0070>
- Hernandez Marquina, M.V., Zwolinski, P., Mangione, F., 2021. Application of Value Stream Mapping tool to improve circular systems. *Clean. Eng. Technol.* 5, 100270. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100270>
- Hidalgo-Crespo, J., Moreira, C.M., Jervis, F.X., Soto, M., Amaya, J.L., Banguera, L., 2022. Circular economy of expanded polystyrene container production: Environmental benefits of household waste recycling considering renewable energies. *Energy Rep.* 8, 306–311. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.01.071>
- Hjorth, S., Chrysostomou, D., 2022. Human–robot collaboration in industrial environments: A literature review on non-destructive disassembly. *Robot. Comput.-Integr. Manuf.* 73, 102208. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2021.102208>
- Howard, M., Yan, X., Mustafee, N., Charnley, F., Böhm, S., Pascucci, S., 2022. Going beyond waste reduction: Exploring tools and methods for circular economy adoption in small-medium enterprises. *Resour. Conserv. Recycl.* 182, 106345. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106345>
- Hummen, T., Desing, H., 2021. When to replace products with which (circular) strategy? An optimization approach and lifespan indicator. *Resour. Conserv. Recycl.* 174, 105704. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105704>
- Jackson, M., Lederwasch, A., Giurco, D., 2014. Transitions in Theory and Practice: Managing Metals in the Circular Economy. *Resources* 3, 516–543. <https://doi.org/10.3390/resources3030516>
- Jayakumar, J., K., J., K.E.K., V., Hasibuan, S., 2020. Modelling of sharing networks in the circular economy. *J. Model. Manag.* 15, 407–440. <https://doi.org/10.1108/JM2-05-2019-0101>

Jungnickel, K., 2017. Interdisziplinäre Meinungsführerforschung: Eine systematische Literaturanalyse. Hohenheim.

Kalaboukas, K., Rožanec, J., Košmerlj, A., Kiritsis, D., Arampatzis, G., 2021. Implementation of Cognitive Digital Twins in Connected and Agile Supply Networks—An Operational Model. *Appl. Sci.* 11, 4103. <https://doi.org/10.3390/app11094103>

Kalmykova, Y., Sadagopan, M., Rosado, L., 2018. Circular economy – From review of theories and practices to development of implementation tools. *Resour. Conserv. Recycl.* 135, 190–201. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.10.034>

Kamble, S.S., Belhadi, A., Gunasekaran, A., Ganapathy, L., Verma, S., 2021. A large multi-group decision-making technique for prioritizing the big data-driven circular economy practices in the automobile component manufacturing industry. *Technol. Forecast. Soc. Change* 165, 120567. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2020.120567>

Kamp Albæk, J., Shahbazi, S., McAlloone, T.C., Pigosso, D.C.A., 2020. Circularity Evaluation of Alternative Concepts During Early Product Design and Development. *Sustainability* 12, 9353. <https://doi.org/10.3390/su12229353>

Karagiannopoulos, P.S., Manousakis, N.M., Psomopoulos, C.S., 2021. A Novel ILP Formulation for PCB Maintenance Considering Electrical Measurements and Aging Factors: A “Right to Repair” Approach. *Energies* 15, 183. <https://doi.org/10.3390/en15010183>

Khan, A., Mineo, C., Dobie, G., Macleod, C., Pierce, G., 2021. Vision guided robotic inspection for parts in manufacturing and remanufacturing industry. *J. Remanufacturing* 11, 49–70. <https://doi.org/10.1007/s13243-020-00091-x>

Khayyam, H., Naebe, M., Milani, A.S., Fakhrhoseini, S.M., Date, A., Shabani, B., Atkiss, S., Ramakrishna, S., Fox, B., Jazar, R.N., 2021. Improving energy efficiency of carbon fiber manufacturing through waste heat recovery: A circular economy approach with machine learning. *Energy* 225, 120113. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120113>

Kimita, K., Brambila-Macias, S.A., Tillman, A., Sakao, T., 2021. Failure analysis method for enhancing circularity through systems perspective. *J. Ind. Ecol.* 25, 544–562. <https://doi.org/10.1111/jiec.13069>

Kintscher, L., Lawrenz, S., Poschmann, H., Sharma, P., 2020. Recycling 4.0 - Digitalization as a Key for the Advanced Circular Economy. *J. Commun.* 652–660. <https://doi.org/10.12720/jcm.15.9.652-660>

Kirchherr, J., Reike, D., Hekkert, M., 2017. Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. *Resour. Conserv. Recycl.* 127, 221–232. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.005>

Kleine, A., 2009. Operationalisierung einer Nachhaltigkeitsstrategie. Gabler, Wiesbaden. <https://doi.org/10.1007/978-3-8349-9414-1>

Kopfmüller, J., Brandl, V., Jörissen, J., Paetau, M., Banse, G., Coenen, R., Grunwald, A., 2001. Nachhaltige Entwicklung integrativ betrachtet: Konstitutive Elemente, Regeln, Indikatoren. edition sigma, Berlin.

Kranert, M. (Ed.), 2017. Einführung in die Kreislaufwirtschaft: Planung -- Recht -- Verfahren. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden. <https://doi.org/10.1007/978-3-8348-2257-4>

- Krausmann, F., Gingrich, S., Eisenmenger, N., Erb, K.-H., Haberl, H., Fischer-Kowalski, M., 2009. Growth in global materials use, GDP and population during the 20th century. *Ecol. Econ.* 68, 2696–2705. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2009.05.007>
- Krausmann, F., Lauk, C., Haas, W., Wiedenhofer, D., 2018. From resource extraction to outflows of wastes and emissions: The socioeconomic metabolism of the global economy, 1900–2015. *Glob. Environ. Change* 52, 131–140. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2018.07.003>
- Kravchenko, M., Pigosso, D.C.A., McAlloone, T.C., 2020. A Trade-Off Navigation Framework as a Decision Support for Conflicting Sustainability Indicators within Circular Economy Implementation in the Manufacturing Industry. *Sustainability* 13, 314. <https://doi.org/10.3390/su13010314>
- KU, K.U., 2014. Leitlinien für die Einbeziehung von Nachhaltigkeit in Normen (ISO Guide 82:2014) (DIN SPEC 35200).
- Kühl, C., Bourlakis, M., Aktas, E., Skipworth, H., 2022. Product-service systems and circular supply chain practices in UK SMEs: The moderating effect of internal environmental orientation. *J. Bus. Res.* 146, 155–165. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2022.03.078>
- Kurt, A., Cortes-Cornax, M., Cung, V.-D., Front, A., Mangione, F., 2021. A Classification Tool for Circular Supply Chain Indicators, in: Dolgui, A., Bernard, A., Lemoine, D., von Cieminski, G., Romero, D. (Eds.), *Advances in Production Management Systems. Artificial Intelligence for Sustainable and Resilient Production Systems*, IFIP Advances in Information and Communication Technology. Springer International Publishing, Cham, pp. 644–653. https://doi.org/10.1007/978-3-030-85914-5_68
- Ladwig, R. (Ed.), 2003. *Recycling in Geschichte und Gegenwart: Vorträge der Jahrestagung der Georg-Agricola-Gesellschaft 2002 in Freiberg (Sachsen), Die Technikgeschichte als Vorbild moderner Technik / 28*. Freiberg.
- Lähdeaho, O., Hilmola, O.-P., 2020. Business Models Amid Changes in Regulation and Environment: The Case of Finland–Russia. *Sustainability* 12, 3393. <https://doi.org/10.3390/su12083393>
- Laskurain-Iturbe, I., Arana-Landín, G., Landeta-Manzano, B., Uriarte-Gallastegi, N., 2021. Exploring the influence of industry 4.0 technologies on the circular economy. *J. Clean. Prod.* 321, 128944. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128944>
- Lee, J.-E., Chung, K.-Y., Lee, K.-D., Gen, M., 2015. A multi-objective hybrid genetic algorithm to minimize the total cost and delivery tardiness in a reverse logistics. *Multimed. Tools Appl.* 74, 9067–9085. <https://doi.org/10.1007/s11042-013-1594-6>
- Lee, J.K.Y., Gholami, H., Saman, M.Z.M., Ngadiman, N.H.A.B., Zakuan, N., Mahmood, S., Omain, S.Z., 2021. Sustainability-Oriented Application of Value Stream Mapping: A Review and Classification. *IEEE Access* 9, 68414–68434. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3077570>
- Lee, S.Y., Hu, J., Lim, M.K., 2021. Maximising the circular economy and sustainability outcomes: An end-of-life tyre recycling outlets selection model. *Int. J. Prod. Econ.* 232, 107965. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2020.107965>
- Lenton, T.M., 2011. Early warning of climate tipping points. *Nat. Clim. Change* 1, 201–209. <https://doi.org/10.1038/nclimate1143>

- Li, H., Bao, W., Xiu, C., Zhang, Y., Xu, H., 2010. Energy conservation and circular economy in China's process industries. *Energy, Energy and Its Sustainable Development for China* 35, 4273–4281. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2009.04.021>
- Liao, T.-Y., 2018. Reverse logistics network design for product recovery and remanufacturing. *Appl. Math. Model.* 60, 145–163. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2018.03.003>
- Lim, M.K., Lai, M., Wang, C., Lee, S.Y., 2022. Circular economy to ensure production operational sustainability: A green-lean approach. *Sustain. Prod. Consum.* 30, 130–144. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.12.001>
- Lindkvist Haziri, L., Sundin, E., 2020. Supporting design for remanufacturing - A framework for implementing information feedback from remanufacturing to product design. *J. Remanufacturing* 10, 57–76. <https://doi.org/10.1007/s13243-019-00074-7>
- Liu, Z.Y., Guo, Y.B., Cao, H.J., Zhao, G.Y., Liu, Z.Q., 2017. Embodied Energy in Dry Cutting under Consumption of Tool and Materials. *Procedia CIRP, The 24th CIRP Conference on Life Cycle Engineering* 61, 535–540. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.11.207>
- Lozano-Miralles, J.A., Hermoso-Orzáez, M.J., Gago-Calderón, A., Brito, P., 2019. LCA Case Study to LED Outdoor Luminaries as a Circular Economy Solution to Local Scale. *Sustainability* 12, 190. <https://doi.org/10.3390/su12010190>
- Ma, S., Zhang, Y., Liu, Y., Yang, H., Lv, J., Ren, S., 2020. Data-driven sustainable intelligent manufacturing based on demand response for energy-intensive industries. *J. Clean. Prod.* 274, 123155. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123155>
- Macqueen, M., Noetstaller, R., 1997. Langfristige Entwicklung der Metallnachfrage - Tendenzen und Paradigmen. *BERG HUTTENMANNISCHE MONATSFESTE* 142, S. 352-S. 357.
- Makarova, I., Pashkevich, A., Shubenkova, K., Lenik, P., 2018a. Improvement of automotive spare parts delivery in the context of markets globalization 5.
- Makarova, I., Pashkevich, A., Shubenkova, K., Lenik, P., 2018b. IMPROVEMENT OF AUTOMOTIVE SPARE PARTS DELIVERY IN THE CONTEXT OF MARKETS GLOBALIZATION 5.
- Mallett, R., Hagen-Zanker, J., Slater, R., Duvendack, M., 2012. The Benefits and Challenges of Using Systematic Reviews in International Development Research. *J. Dev. Eff.* 4, 445. <https://doi.org/10.1080/19439342.2012.711342>
- Manavalan, E., Jayakrishna, K., 2019. An Analysis on Sustainable Supply Chain for Circular Economy. *Procedia Manuf., Sustainable Manufacturing for Global Circular Economy: Proceedings of the 16th Global Conference on Sustainable Manufacturing* 33, 477–484. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.04.059>
- Margallo, M., Ruiz-Salmón, I., Laso, J., Bala, A., Colomé, R., Gazulla, C., Fullana-i-Palmer, P., Aldaco, R., 2021. Combining technical, environmental, social and economic aspects in a life-cycle ecodesign methodology: An integrated approach for an electronic toy. *J. Clean. Prod.* 278, 123452. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123452>
- Martínez-Cámara, E., Santamaría, J., Sanz-Adán, F., Arancón, D., 2021a. Digital Eco-Design and Life Cycle Assessment—Key Elements in a Circular Economy: A Case Study of a Conventional Desk. *Appl. Sci.* 11, 10439. <https://doi.org/10.3390/app112110439>

- Martínez-Cámara, E., Santamaría, J., Sanz-Adán, F., Arancón, D., 2021b. Digital Eco-Design and Life Cycle Assessment—Key Elements in a Circular Economy: A Case Study of a Conventional Desk. *Appl. Sci.* 11, 10439. <https://doi.org/10.3390/app112110439>
- Martín-Gómez, A., Ávila-Gutiérrez, M.J., Aguayo-González, F., 2021. Holonic Reengineering to Foster Sustainable Cyber-Physical Systems Design in Cognitive Manufacturing. *Appl. Sci.* 11, 2941. <https://doi.org/10.3390/app11072941>
- Mauch, C., 2014. Mensch und Umwelt: Nachhaltigkeit aus historischer Perspektive. Oekom.
- Mayer, K., 2017. Nachhaltigkeit: 111 Fragen und Antworten: Nachschlagewerk zur Umsetzung von CSR im Unternehmen, 1. Aufl. 2017 Edition. ed. Springer Gabler, Wiesbaden Heidelberg.
- McDonough, W., Braungart, M., 2002. *Cradle to Cradle: Remaking the Way We Make Things*, 1st ed. Macmillan USA, New York.
- Meadows, D., Meadows, D.H., Zahn, E., Milling, P., 1972. Die Grenzen des Wachstums. Bericht des Club of Rome zur Lage der Menschheit. Deutsche Verlags-Anstalt, Stuttgart.
- Medina-Salgado, M.S., García-Muiña, F.E., Cucchi, M., Settembre-Blundo, D., 2021. Adaptive Life Cycle Costing (LCC) Modeling and Applying to Italy Ceramic Tile Manufacturing Sector: Its Implication of Open Innovation. *J. Open Innov. Technol. Mark. Complex.* 7, 101. <https://doi.org/10.3390/joitmc7010101>
- Miettunen, K., Santasalo-Aarnio, A., 2021. Eco-design for dye solar cells: From hazardous waste to profitable recovery. *J. Clean. Prod.* 320, 128743. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128743>
- Moktadir, Md.A., Ali, S.M., Paul, S.K., Shukla, N., 2019. Barriers to big data analytics in manufacturing supply chains: A case study from Bangladesh. *Comput. Ind. Eng.* 128, 1063–1075. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.04.013>
- Moretti, C., Hamelin, L., Jakobsen, L.G., Junginger, M.H., Steingrimsdottir, M.M., Høiby, L., Shen, L., 2021. Cradle-to-grave life cycle assessment of single-use cups made from PLA, PP and PET. *Resour. Conserv. Recycl.* 169, 105508. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105508>
- Morgan, D.R., Styles, D., Thomas Lane, E., 2022. Packaging choice and coordinated distribution logistics to reduce the environmental footprint of small-scale beer value chains. *J. Environ. Manage.* 307, 114591. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114591>
- Murray, A., Skene, K., Haynes, K., 2017. The Circular Economy: An Interdisciplinary Exploration of the Concept and Application in a Global Context. *J. Bus. Ethics* 140, 369–380. <https://doi.org/10.1007/s10551-015-2693-2>
- Nadkarni, R.R., Puthuvayi, B., 2020. A comprehensive literature review of Multi-Criteria Decision Making methods in heritage buildings. *J. Build. Eng.* 32, 101814. <https://doi.org/10.1016/j.jobte.2020.101814>
- Nakamura, S., Kondo, Y., 2018. Toward an integrated model of the circular economy: Dynamic waste input–output. *Resour. Conserv. Recycl.* 139, 326–332. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.07.016>
- Nañez Alonso, S.L., Reier Forradellas, R.F., Pi Morell, O., Jorge-Vazquez, J., 2021. Digitalization, Circular Economy and Environmental Sustainability: The Application of Artificial Intelligence in the Efficient Self-Management of Waste. *Sustainability* 13, 2092. <https://doi.org/10.3390/su13042092>

Nascimento, D.L.M., Alencastro, V., Quelhas, O.L.G., Caiado, R.G.G., Garza-Reyes, J.A., Rocha-Lona, L., Tortorella, G., 2018. Exploring Industry 4.0 technologies to enable circular economy practices in a manufacturing context: A business model proposal. *J. Manuf. Technol. Manag.* 30, 607–627. <https://doi.org/10.1108/JMTM-03-2018-0071>

Negri, M., Neri, A., Cagno, E., Monfardini, G., 2021. Circular Economy Performance Measurement in Manufacturing Firms: A Systematic Literature Review with Insights for Small and Medium Enterprises and New Adopters. *Sustainability* 13, 9049. <https://doi.org/10.3390/su13169049>

Neramballi, A., Sakao, T., Willskytt, S., Tillman, A.-M., 2020. A design navigator to guide the transition towards environmentally benign product/service systems based on LCA results. *J. Clean. Prod.* 277, 124074. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124074>

Niero, M., Kalbar, P.P., 2019. Coupling material circularity indicators and life cycle based indicators: A proposal to advance the assessment of circular economy strategies at the product level. *Resour. Conserv. Recycl.* 140, 305–312. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.10.002>

Noman, A.A., Akter, U.H., Pranto, T.H., Haque, A.B., 2022. Machine Learning and Artificial Intelligence in Circular Economy: A Bibliometric Analysis and Systematic Literature Review. *Ann. Emerg. Technol. Comput.* 6, 13–40. <https://doi.org/10.33166/AETiC.2022.02.002>

Nowakowski, P., Szwarc, K., Boryczka, U., 2020. Combining an artificial intelligence algorithm and a novel vehicle for sustainable e-waste collection. *Sci. Total Environ.* 730, 138726. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138726>

OECD, 2016. *Farm Management Practices to Foster Green Growth*.

OECD (Organisation for Economic Co-Operation and Development), 2019. *Global Material Resources Outlook to 2060: Economic Drivers and Environmental Consequences*. OECD. <https://doi.org/10.1787/9789264307452-en>

Palmatier, R.W., Houston, M.B., Hulland, J., 2018. Review articles: purpose, process, and structure. *J. Acad. Mark. Sci.* 46, 1–5. <https://doi.org/10.1007/s11747-017-0563-4>

Pandian, G.R.S., Abdul-Kader, W., 2017. Performance evaluation of reverse logistics enterprise – an agent-based simulation approach. *Int. J. Sustain. Eng.* 10, 384–398. <https://doi.org/10.1080/19397038.2017.1370032>

Patil, T., Rebaioli, L., Fassi, I., 2022. Cyber-physical systems for end-of-life management of printed circuit boards and mechatronics products in home automation: A review. *Sustain. Mater. Technol.* 32, e00422. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2022.e00422>

Paul, J., Lim, W.M., O’Cass, A., Hao, A.W., Bresciani, S., 2021. Scientific procedures and rationales for systematic literature reviews (SPAR-4-SLR). *Int. J. Consum. Stud.* 45, O1–O16. <https://doi.org/10.1111/ijcs.12695>

Pfister, C., 1996. *Das 1950er Syndrom: Der Weg in die Konsumgesellschaft*, 2nd ed. Verlag Paul Haupt, Bern, Stuttgart und Wien.

Pfister, G., 2002. Indikatoren einer nachhaltigen Entwicklung im Bereich “Wirtschaft,” *Arbeitsbericht / Akademie für Technikfolgenabschätzung in Baden-Württemberg*. Akad. für Technikfolgenabschätzung in Baden-Württemberg, Stuttgart.

Pham, T.T., Kuo, T.-C., Tseng, M.-L., Tan, R.R., Tan, K., Ika, D.S., Lin, C.J., 2019. Industry 4.0 to Accelerate the Circular Economy: A Case Study of Electric Scooter Sharing. *Sustainability* 11, 6661. <https://doi.org/10.3390/su11236661>

Pigosso, D.C.A., McAloone, T.C., 2021. Making the transition to a Circular Economy within manufacturing companies: the development and implementation of a self-assessment readiness tool. *Sustain. Prod. Consum.* 28, 346–358. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.05.011>

Plank, B., Eisenmenger, N., Schaffartzik, A., 2021. Do material efficiency improvements backfire?: Insights from an index decomposition analysis about the link between CO2 emissions and material use for Austria. *J. Ind. Ecol.* 25, 511–522. <https://doi.org/10.1111/jiec.13076>

Poschmann, H., Brüggemann, H., Goldmann, D., 2021. Fostering End-of-Life Utilization by Information-driven Robotic Disassembly. *Procedia CIRP, The 28th CIRP Conference on Life Cycle Engineering, March 10 – 12, 2021, Jaipur, India* 98, 282–287. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.01.104>

PRC, 2008. Circular Economy Promotion Law of the People's Republic of China. China.

Putnam, R.D., 1993. The prosperous Community – social Capital and public Life. *Am. Prospect* S.35-42.

Rahito, Wahab, D., Azman, A., 2019. Additive Manufacturing for Repair and Restoration in Remanufacturing: An Overview from Object Design and Systems Perspectives. *Processes* 7, 802. <https://doi.org/10.3390/pr7110802>

Rebitzer, G., Ekvall, T., Frischknecht, R., Hunkeler, D., Norris, G., Rydberg, T., Schmidt, W.-P., Suh, S., Weidema, B.P., Pennington, D.W., 2004. Life cycle assessment: Part 1: Framework, goal and scope definition, inventory analysis, and applications. *Environ. Int.* 30, 701–720. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2003.11.005>

Rehman Khan, S.A., Yu, Z., Sarwat, S., Godil, D.I., Amin, S., Shujaat, S., 2022. The role of block chain technology in circular economy practices to improve organisational performance. *Int. J. Logist. Res. Appl.* 25, 605–622. <https://doi.org/10.1080/13675567.2021.1872512>

Rentizelas, A., Trivyza, N., Oswald, S., Siegl, S., 2022. Reverse supply network design for circular economy pathways of wind turbine blades in Europe. *Int. J. Prod. Res.* 60, 1795–1814. <https://doi.org/10.1080/00207543.2020.1870016>

Ridder, W., Turnpenny, J., Nilsson, M., Von Raggamby, A., 2007. A Framework For Tool Selection and Use in Integrated Assessment For Sustainable Development. *J. Environ. Assess. Policy Manag. JEAPM* 09, 423–441. <https://doi.org/10.1142/S1464333207002883>

Rigamonti, L., Falbo, A., Zampori, L., Sala, S., 2017. Supporting a transition towards sustainable circular economy: sensitivity analysis for the interpretation of LCA for the recovery of electric and electronic waste. *Int. J. Life Cycle Assess.* 22, 1278–1287. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1231-5>

Rizvi, S.W.H., Agrawal, S., Murtaza, Q., 2021. Circular economy under the impact of IT tools: a content-based review. *Int. J. Sustain. Eng.* 14, 87–97. <https://doi.org/10.1080/19397038.2020.1773567>

Roci, M., Salehi, N., Amir, S., Asif, Farazee.M.A., Shoaib-ul-Hasan, S., Rashid, A., 2022a. Multi-method simulation modelling of circular manufacturing systems for enhanced decision-making. *MethodsX* 9, 101709. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2022.101709>

- Roci, M., Salehi, N., Amir, S., Shoaib-ul-Hasan, S., Asif, F.M.A., Mihelič, A., Rashid, A., 2022b. Towards circular manufacturing systems implementation: A complex adaptive systems perspective using modelling and simulation as a quantitative analysis tool. *Sustain. Prod. Consum.* 31, 97–112. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2022.01.033>
- Roithner, C., Cencic, O., Rechberger, H., 2022. Product design and recyclability: How statistical entropy can form a bridge between these concepts - A case study of a smartphone. *J. Clean. Prod.* 331, 129971. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129971>
- Romani, A., Rognoli, V., Levi, M., 2021. Design, Materials, and Extrusion-Based Additive Manufacturing in Circular Economy Contexts: From Waste to New Products. *Sustainability* 13, 7269. <https://doi.org/10.3390/su13137269>
- Rybczewska-Błażejowska, M., Masternak-Janus, A., 2021. Assessing and Improving the Eco-Efficiency of Manufacturing: Learning and Challenges from a Polish Case Study. *Energies* 14, 8125. <https://doi.org/10.3390/en14238125>
- Saboori, A., Aversa, A., Marchese, G., Biamino, S., Lombardi, M., Fino, P., 2019. Application of Directed Energy Deposition-Based Additive Manufacturing in Repair. *Appl. Sci.* 9, 3316. <https://doi.org/10.3390/app9163316>
- Sacco, P., Vinante, C., Borgianni, Y., Orzes, G., 2021. Circular Economy at the Firm Level: A New Tool for Assessing Maturity and Circularity. *Sustainability* 13, 5288. <https://doi.org/10.3390/su13095288>
- Sakr, D., Baas, L., El-Haggag, S., Huisingh, D., 2011. Critical success and limiting factors for eco-industrial parks: global trends and Egyptian context. *J. Clean. Prod.* 19, 1158–1169. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.01.001>
- Sassanelli, C., Rosa, P., Rocca, R., Terzi, S., 2019. Circular economy performance assessment methods: A systematic literature review. *J. Clean. Prod.* 229, 440–453. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.019>
- Scheepens, A.E., Vogtländer, J.G., Brezet, J.C., 2016. Two life cycle assessment (LCA) based methods to analyse and design complex (regional) circular economy systems. Case: making water tourism more sustainable. *J. Clean. Prod., Towards Post Fossil Carbon Societies: Regenerative and Preventative Eco-Industrial Development* 114, 257–268. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.05.075>
- Schlüter, M., Lickert, H., Schweitzer, K., Bilge, P., Briese, C., Dietrich, F., Krüger, J., 2021. AI-enhanced Identification, Inspection and Sorting for Reverse Logistics in Remanufacturing. *Procedia CIRP, The 28th CIRP Conference on Life Cycle Engineering, March 10 – 12, 2021, Jaipur, India* 98, 300–305. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.01.107>
- Schulte, A., Maga, D., Thonemann, N., 2021. Combining Life Cycle Assessment and Circularity Assessment to Analyze Environmental Impacts of the Medical Remanufacturing of Electrophysiology Catheters. *Sustainability* 13, 898. <https://doi.org/10.3390/su13020898>
- Šerešová, M., Kočí, V., 2020. Proposal of Package-to-Product Indicator for Carbon Footprint Assessment with Focus on the Czech Republic. *Sustainability* 12, 3034. <https://doi.org/10.3390/su12073034>
- Sergio, M., Franciosi, C., Iannone, R., 2022. An approach to evaluate the impact of the introduction of a disassembly line in traditional manufacturing systems. *J. Ind. Eng. Manag.* 15, 215. <https://doi.org/10.3926/jiem.3605>

Shahbazi, S., Jönbrink, A.K., 2020. Design Guidelines to Develop Circular Products: Action Research on Nordic Industry. *Sustainability* 12, 3679. <https://doi.org/10.3390/su12093679>

Shen, L., Olfat, L., Govindan, K., Khodaverdi, R., Diabat, A., 2013. A fuzzy multi criteria approach for evaluating green supplier's performance in green supply chain with linguistic preferences. *Resour. Conserv. Recycl.* 74, 170–179. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2012.09.006>

Shi, X., Li, L.X., Yang, L., Li, Z., Choi, J.Y., 2012. Information flow in reverse logistics: an industrial information integration study. *Inf. Technol. Manag.* 13, 217–232. <https://doi.org/10.1007/s10799-012-0116-y>

Sitadewi, D., Yudoko, G., Okdinawati, L., 2021. Bibliographic mapping of post-consumer plastic waste based on hierarchical circular principles across the system perspective. *Heliyon* 7, e07154. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e07154>

Snyder, H., 2019. Literature review as a research methodology: An overview and guidelines. *J. Bus. Res.* 104, 333–339. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2019.07.039>

Solangi, Y.A., Tan, Q., Mirjat, N.H., Valasai, G.D., Khan, M.W.A., Ikram, M., 2019. An Integrated Delphi-AHP and Fuzzy TOPSIS Approach toward Ranking and Selection of Renewable Energy Resources in Pakistan. *Processes* 7, 118. <https://doi.org/10.3390/pr7020118>

Song, Z., Moon, Y., 2017. Assessing sustainability benefits of cybermanufacturing systems. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 90, 1365–1382. <https://doi.org/10.1007/s00170-016-9428-0>

Sprefafico, C., Landi, D., 2022. Using Product Design Strategies to Implement Circular Economy: Differences between Students and Professional Designers. *Sustainability* 14, 1122. <https://doi.org/10.3390/su14031122>

SRU, (Sachverständigenrat für Umweltfragen, 2002. Umweltgutachten 2002 - für eine neue Vorreiterrolle (No. 14/8792). Berlin.

Stadler, K., Wood, R., Bulavskaya, T., Södersten, C.-J., Simas, M., Schmidt, S., Usubiaga, A., Acosta-Fernández, J., Kuenen, J., Bruckner, M., Giljum, S., Lutter, S., Merciai, S., Schmidt, J.H., Theurl, M.C., Plutzar, C., Kastner, T., Eisenmenger, N., Erb, K.-H., de Koning, A., Tukker, A., 2018. EXIOBASE 3: Developing a Time Series of Detailed Environmentally Extended Multi-Regional Input-Output Tables: EXIOBASE 3. *J. Ind. Ecol.* 22, 502–515. <https://doi.org/10.1111/jiec.12715>

Stankevičienė, J., Nikanorova, M., 2020. ECO-INNOVATION AS A PILLAR FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT OF CIRCULAR ECONOMY. *Bus. Theory Pract.* 21, 531–544. <https://doi.org/10.3846/btp.2020.12963>

Statistik Austria, 2020. Materialflussrechnung [WWW Document]. URL <https://www.statistik.at/statistiken/energie-und-umwelt/umwelt/materialflussrechnung> (accessed 6.26.22).

Stavropoulos, P., Spetsieris, A., Papacharalampopoulos, A., 2019. A Circular Economy based Decision Support System for the Assembly/Disassembly of Multi-Material Components. *Procedia CIRP*, 2nd CIRP Conference on Composite Material Parts Manufacturing, 10-11 October 2019, Advanced Manufacturing Research Centre, UK 85, 49–54. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.09.033>

Steffen, W., Richardson, K., Rockström, J., Cornell, S.E., Fetzer, I., Bennett, E.M., Biggs, R., Carpenter, S.R., de Vries, W., de Wit, C.A., Folke, C., Gerten, D., Heinke, J., Mace, G.M., Persson, L.M.,

- Ramanathan, V., Reyers, B., Sörlin, S., 2015. Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. *Science* 347, 1259855. <https://doi.org/10.1126/science.1259855>
- Stock, T., Seliger, G., 2016. Opportunities of Sustainable Manufacturing in Industry 4.0. *Procedia CIRP*, 13th Global Conference on Sustainable Manufacturing – Decoupling Growth from Resource Use 40, 536–541. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.01.129>
- Tao, F., Cheng, J., Qi, Q., Zhang, M., Zhang, H., Sui, F., 2018. Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 94, 3563–3576. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0233-1>
- Thorley, J., Garza-Reyes, J.A., Anosike, A., 2022. Circular economy: a conceptual model to measure readiness for manufacturing SMEs. *Benchmarking Int. J.* 29, 1362–1390. <https://doi.org/10.1108/BIJ-03-2021-0161>
- Torcătoru, C., Săvescu, D., Repanovici, A., 2022a. Literature Review by Scientometric Methods on the Impact of the Circular Economy on Sustainable Industrial Products. *Sustainability* 14, 5084. <https://doi.org/10.3390/su14095084>
- Torcătoru, C., Săvescu, D., Repanovici, A., 2022b. Literature Review by Scientometric Methods on the Impact of the Circular Economy on Sustainable Industrial Products. *Sustainability* 14, 5084. <https://doi.org/10.3390/su14095084>
- Tóth Szita, K., 2017. THE APPLICATION OF LIFE CYCLE ASSESSMENT IN CIRCULAR ECONOMY. *Hung. Agric. Eng.* 31, 5–9.
- Tranfield, D., Denyer, D., Smart, P., 2003. Towards a Methodology for Developing Evidence-Informed Management Knowledge by Means of Systematic Review. *Br. J. Manag.* 14, 207–222. <https://doi.org/10.1111/1467-8551.00375>
- Tremmel, J., 2003. Nachhaltigkeit als politische und analytische Kategorie: Der deutsche Diskurs um nachhaltige Entwicklung im Spiegel der Interessen der Akteure, 1., Edition. ed. oekom verlag, München.
- Trollman, H., Colwill, J., Jagtap, S., 2021. A Circularity Indicator Tool for Measuring the Ecological Embeddedness of Manufacturing. *Sustainability* 13, 8773. <https://doi.org/10.3390/su13168773>
- Turner, C., Moreno, M., Mondini, L., Salonitis, K., Charnley, F., Tiwari, A., Hutabarat, W., 2019. Sustainable Production in a Circular Economy: A Business Model for Re-Distributed Manufacturing. *Sustainability* 11, 4291. <https://doi.org/10.3390/su11164291>
- Turner, C., Okorie, O., Emmanouilidis, C., Oyekan, J., 2022. Circular production and maintenance of automotive parts: An Internet of Things (IoT) data framework and practice review. *Comput. Ind.* 136, 103593. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2021.103593>
- Turoff, M., Linstone, H.A., 2002. The Delphi Method: Techniques and Applications 618.
- UNEP, 2011. Towards a Green Economy: Pathways to Sustainable Development and Poverty Eradication.
- Vacchi, M., Siligardi, C., Cedillo-González, E.I., Ferrari, A.M., Settembre-Blundo, D., 2021. Industry 4.0 and Smart Data as Enablers of the Circular Economy in Manufacturing: Product Re-Engineering with Circular Eco-Design. *Sustainability* 13, 10366. <https://doi.org/10.3390/su131810366>

- van Eck, N.J., Waltman, L., 2010. Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping. *Scientometrics* 84, 523–538. <https://doi.org/10.1007/s11192-009-0146-3>
- VDI 4521, B. 1, 2021. Erfinderisches Problemlösen mit TRIZ - Grundlagen und Begriffe. Verein Deutscher Ingenieure e.V., Berlin.
- Vereinte Nationen (UN), 2022. Ziele für nachhaltige Entwicklung [WWW Document]. V.N. - Reg. Informationszentrum Für Westeur. URL <https://unric.org/de/17ziele/> (accessed 3.20.22).
- Vereinte Nationen (UN), 2017. General Assembly on 6 July 2017: Work of the Statistical Commission pertaining to the 2030 Agenda for Sustainable Development (No. Resolution71/313).
- Vereinte Nationen (UN), 2015a. Resolution der Generalversammlung, verabschiedet am 25. September 2015: Transformation unserer Welt-Die Agenda 2030 für nachhaltige Entwicklung.
- Vereinte Nationen (UN), 2015b. Übereinkommen von Paris. Paris.
- Vereinte Nationen (UN), 2012. Resolution der Generalversammlung, verabschiedet am 27. Juli 2012: Die Zukunft, die wir wollen (No. Resolution 66/288). Rio de Janeiro.
- von der Gracht, H.A., 2012. Consensus measurement in Delphi studies. *Technol. Forecast. Soc. Change* 79, 1525–1536. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2012.04.013>
- von Hauff, M., 2007. Die Zukunftsfähigkeit der Sozialen Marktwirtschaft. Metropolis, Marburg.
- Walcher, D., Leube, M., 2017. Kreislaufwirtschaft in Design und Produktmanagement, essentials. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-18512-1>
- Wallace-Wells, D., 2019. Die unbewohnbare Erde: Leben nach der Erderwärmung, Deutsche Erstausgabe Edition. ed. Ludwig Buchverlag, München.
- Wang, D., Zhang, Y., 2020. Implications for sustainability in supply chain management and the circular economy using machine learning model. *Inf. Syst. E-Bus. Manag.* <https://doi.org/10.1007/s10257-020-00477-1>
- Wang, S., Wan, J., Li, D., Zhang, C., 2016. Implementing Smart Factory of Industrie 4.0: An Outlook. *Int. J. Distrib. Sens. Netw.* 12, 3159805. <https://doi.org/10.1155/2016/3159805>
- WCED, 1987. Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future.
- Wibbeke, L.-M., 2019. Leitfaden für die Anfertigung wissenschaftlicher Arbeiten.
- Wiedmann, T.O., Schandl, H., Lenzen, M., Moran, D., Suh, S., West, J., Kanemoto, K., 2015. The material footprint of nations. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 112, 6271–6276. <https://doi.org/10.1073/pnas.1220362110>
- Wilts, H., Fink, P., 2016. Deutschland auf dem Weg in die Kreislaufwirtschaft. *MÜLL ABFALL* 3. <https://doi.org/10.37307/j.1863-9763.2016.06.03>
- Wilts, H., Garcia, B.R., Garlito, R.G., Gómez, L.S., Prieto, E.G., 2021. Artificial Intelligence in the Sorting of Municipal Waste as an Enabler of the Circular Economy. *Resources* 10, 28. <https://doi.org/10.3390/resources10040028>
- Wittpahl, V. (Ed.), 2020. Klima: Politik & Green Deal | Technologie & Digitalisierung | Gesellschaft & Wirtschaft. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-62195-0>

Wohlin, C., 2014. Guidelines for snowballing in systematic literature studies and a replication in software engineering, in: Proceedings of the 18th International Conference on Evaluation and Assessment in Software Engineering - EASE '14. Presented at the the 18th International Conference, ACM Press, London, England, United Kingdom, pp. 1–10. <https://doi.org/10.1145/2601248.2601268>

WWF Deutschland, 2019. EU overshooting day Living beyond nature's limits. World Wide Fund for Nature.

WWF Deutschland, W.D., 2016. Living Planet Report 2016.

Yin, P.-Y., Chen, H.-M., Cheng, Y.-L., Wei, Y.-C., Huang, Y.-L., Day, R.-F., 2021. Minimizing the Makespan in Flowshop Scheduling for Sustainable Rubber Circular Manufacturing. *Sustainability* 13, 2576. <https://doi.org/10.3390/su13052576>

Yuan, Z., Bi, J., Moriguchi, Y., 2006. The Circular Economy: A New Development Strategy in China. *J. Ind. Ecol.* 10, 4–8. <https://doi.org/10.1162/108819806775545321>

Zemann, J., 1998. *Energievorräte und mineralische Rohstoffe: Wie lange noch?*, ISBN 3-7001-2731-6. Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften.

Zendoia, J., Woy, U., Ridgway, N., Pajula, T., Unamuno, G., Olaizola, A., Fysikopoulos, A., Krain, R., 2014. A specific method for the life cycle inventory of machine tools and its demonstration with two manufacturing case studies. *J. Clean. Prod.* 78, 139–151. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.05.012>

Zhang, C., Hu, M., Di Maio, F., Sprecher, B., Yang, X., Tukker, A., 2022. An overview of the waste hierarchy framework for analyzing the circularity in construction and demolition waste management in Europe. *Sci. Total Environ.* 803, 149892. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149892>

Zhang, X., Li, Z., Wang, Y., Yan, W., 2021. An Integrated Multicriteria Decision-Making Approach for Collection Modes Selection in Remanufacturing Reverse Logistics. *Processes* 9, 631. <https://doi.org/10.3390/pr9040631>

Zheng, P., Wang, Z., Chen, C.-H., Pheng Khoo, L., 2019. A survey of smart product-service systems: Key aspects, challenges and future perspectives. *Adv. Eng. Inform.* 42, 100973. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2019.100973>

Zhijun, F., Nailing, Y., 2007. Putting a circular economy into practice in China. *Sustain. Sci.* 2, 95–101. <https://doi.org/10.1007/s11625-006-0018-1>

10 Abbildungsverzeichnis

| | |
|--|----|
| Abbildung 1: Änderung des Materialverbrauchs (DMC und MF) in der EU zwischen 2000 und 2015 (BMK, 2020) | 9 |
| Abbildung 2: Vergleich unterschiedlicher Darstellungsformen der Nachhaltigkeitsdimensionen (Rechts: Dreiecksmodell, Mitte: Säulen-Modell, Links: Schnittmengenmodell) (Kleine, 2009) | 15 |
| Abbildung 3: Anzahl der jährlichen Publikationen im Bereich Kreislaufwirtschaft (Datenquelle: Scopus 2001-2021) | 15 |
| Abbildung 4: Vergleich zwischen dem (a) R-Framework der Kreislaufwirtschaft und der (b) Abfallhierarchie (Zhang et al., 2022) | 17 |
| Abbildung 5: Überblick über die Grundprinzipien, Ziele und Befähiger der Kreislaufwirtschaft (vgl. Kirchherr et al., 2017) | 19 |
| Abbildung 6: Schematische Darstellung der Kreislaufwirtschaft (vgl. BMK, 2021) | 24 |
| Abbildung 7: Grundsätze der Kreislaufwirtschaft in Österreich (vgl. BMK, 2021) | 25 |
| Abbildung 8: SPAR-4-SLR Protokoll nach Paul et al. (2021) | 31 |
| Abbildung 9: Identifizierung relevanter Publikationen gemäß Grenz-Farenholtz (2013) | 32 |
| Abbildung 10: Workflow des Bibliometrix R-Paket (vgl. Aria and Cuccurullo, 2017) | 33 |
| Abbildung 11: Beispielhafte Kriterienhierarchie (vgl. Geldermann and Lerche, 2014) | 36 |
| Abbildung 12: Vorgehen bei der multikriteriellen Entscheidungsfindung angelehnt an Ahmed et al. (2022) | 37 |
| Abbildung 13: Entscheidungsmatrix (vgl. Ahmed et al., 2022) | 38 |
| Abbildung 14: Wichtigkeitsmatrix (vgl. Ahmed et al., 2022) | 39 |
| Abbildung 15: Iteratives Ein- und Ausschlussverfahren zur Qualitätsbewertung der Literatur | 44 |
| Abbildung 16: Entwickelter Kodierungsrahmen zur thematischen Analyse der Literatur | 47 |
| Abbildung 17: Jährliche und kumulative Anzahl an Publikationen im Bereich „Circular Manufacturing“ zufolge Scopus | 48 |
| Abbildung 18: Verteilung der Veröffentlichungen gemäß Herkunftsland (Top 15) im Bereich „Circular Manufacturing“ zufolge Scopus | 49 |
| Abbildung 19: Verteilung der Veröffentlichungen nach Fördermittelgeber (Top 10) im Bereich „Circular Manufacturing“ zufolge Scopus | 50 |
| Abbildung 20: Verteilung der Veröffentlichung auf Grundlage der Fachzeitschrift (Top 5) im Bereich „Circular Manufacturing“ zufolge Scopus | 50 |
| Abbildung 21: Schlüsselwörter Koinzidenznetzwerk | 51 |
| Abbildung 22: Ergebnis Schnittmengen-Modell Nachhaltigkeitsdimensionen | 55 |
| Abbildung 23: Zusammenfassung der Ergebnisse der SLR | 75 |
| Abbildung 24: Kriterienhierarchie der CM Methoden und Ansätze | 78 |
| Abbildung 25: Vorgehen bei der Delphi Methode (vgl. Emovon et al., 2018; Solangi et al., 2019) | 89 |

11 Formelverzeichnis

| | |
|--|----|
| Gleichung 1: Normierung der Wichtigkeitsmatrix (Ahmed et al., 2022) | 39 |
| Gleichung 2: Berechnung der Kriteriengewichtung (Ahmed et al., 2022) | 39 |
| Gleichung 3: Normierung der Bewertungsmatrix (Ahmed et al., 2022) | 40 |
| Gleichung 4: Maximierung und Minimierung der Kriterien (Stankevičienė and Nikanorova, 2020)..... | 40 |
| Gleichung 5: Euklidischen Distanz zur besten hypothetischen Ideallösung (Ahmed et al., 2022) | 40 |
| Gleichung 6: Euklidischen Distanz zur schlechtesten hypothetischen Ideallösung (Ahmed et al., 2022) | 40 |
| Gleichung 7: Berechnung der Leistungskennzahlen (Ahmed et al., 2022)..... | 41 |

12 Tabellenverzeichnis

| | |
|---|----|
| Tabelle 1: Phasen der systematischen Literaturrecherche (Tranfield et al., 2003)..... | 30 |
| Tabelle 2: Grundstruktur komplexer Entscheidungsprobleme (Geldermann and Lerche, 2014)..... | 35 |
| Tabelle 3: AHP Bewertungsskala (Ahmed et al., 2022) | 39 |
| Tabelle 4: Systematische Literaturrecherche Einschlusskriterien | 43 |
| Tabelle 5: Systematische Literaturrecherche Ausschlusskriterien | 44 |
| Tabelle 6: Sucheingabe systematische Literaturrecherche | 47 |
| Tabelle 7: Nummerierung CM Methoden und Ansätze | 53 |
| Tabelle 8: Zusammenfassung der Ergebnisse thematische Analyse | 57 |
| Tabelle 9: Umwandlungsschema Kriterien K3 bis K5 | 82 |
| Tabelle 10: Umwandlungsschema Kriterium K6 | 82 |
| Tabelle 11: Umwandlungsschema Kriterien K1 und K2 | 82 |
| Tabelle 12: Umwandlungsschema Kriterium K7 | 82 |
| Tabelle 13: Ergebnis Entscheidungsmatrix | 83 |
| Tabelle 14: Ergebnis Wichtigkeitsmatrix | 84 |
| Tabelle 15: Ergebnis Kriteriengewichtung | 84 |
| Tabelle 16: Ergebnis gewichtete normierte Entscheidungsmatrix | 86 |
| Tabelle 17: Ergebnis beste und schlechteste hypothetische Ideallösung | 86 |
| Tabelle 18: Rangfolge CM Methoden und Ansätze | 87 |
| Tabelle 19: Validierungsergebnisse der Kriterien | 90 |

13 Abkürzungsverzeichnis

| | |
|---------|---|
| AB | Agent-Based |
| AHP | Analytic Hierarchy Process |
| AI | Artificial Intelligence |
| AM | Additive Manufacturing |
| AV | Artificial Vision |
| AR | Augmented Reality |
| BMK | Bundesministeriums für Klimaschutz |
| bzw. | beziehungsweise |
| C2C | Cradle to Cradle |
| CCET | Concept Circularity Evaluation Tool |
| CE | Circular Economy |
| CM | Circular Manufacturing |
| CM-FLAT | Circularity and Maturity Firm-Level Assessment Tool |
| CMS | Circular Manufacturing System |
| CMT | Circularity Measurement Toolkit |
| CPS | Cyber-Physical System |
| CSC | Circular-Supply-Chain |
| DES | Discret Event Simulation |
| d.h. | das heißt |
| DMC | Domestic Material Consumption |
| DR | Demand Response |
| DT | Digital Twin |
| dWIO | Dynamic Waste Input-Output |
| EIO | Environmental Input-Output |
| EMF | Ellen MacArthur Foundation |
| EOL | End of Life |
| etc. | et cetera |
| EVB | Electric Vehicle Battery |
| FMEA | Failure Mode And Effect Analysis |
| FMECA | Failure Modes Effect und Criticality Analysis |
| GMA | General Morphologic Analysis |
| I4.0 | Industrie 4.0 |
| ILP | Integer Linear Programming |
| IoT | Internet of Things |
| ISO | International Organization for Standardization |
| KI | Künstliche Intelligenz |
| KMU | Klein- und Mittelständischen Unternehmen |
| LCA | Life Cycle Assessment |
| LCC | Life Cycle Costing |
| LFD | Lifecycle-oriented Function Deployment |
| MAUT | Multi-Attribute Utility Theory |
| MCD | Multi-Criteria Decision |

| | |
|------------|--|
| MCDA | Multi-Criteria Decision Analysis |
| MCDM | Multi-Criteria Decision Making |
| MDG | Millennium Development Goal |
| MF | Material Footprint |
| MFA | Material Flow Analysis |
| MIT | Massachusetts Institute of Technology |
| ML | Machine Learning |
| OECD | Organisation for Economic Co-operation and Development |
| OEL | Optimal Environmental Lifetime |
| PROMETHEE | Preference ranking organization method for enrichment evaluation |
| PSS | Product Service Systems |
| PtP | Package-to-Product |
| QFD | Quality Function Deployment |
| RIFF | Remanufacturing Information Feedback Framework |
| RL | Reverse Logistic |
| SC | Supply Chain |
| SD | System Dynamics |
| SDG | Sustainable Development Goal |
| SLR | Systematische Literaturrecherche |
| SME | Small and Medium Enterprises |
| SPAR-4-SLR | Scientific procedures and rationales for systematic literature reviews |
| TOPSIS | Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution |
| t-PSS | Technical Product Service System |
| UN | United Nation |
| UNCSD | United Nations Conference on Sustainable Development |
| vgl. | vergleiche |
| VR | Virtual Reality |
| VSM | Value Stream Mapping |
| WCED | World Commission on Environment and Development |
| WIO | Waste Input-Output |
| WNDM | Weighted Normalized Decision Matrix |
| WOS | Web of Science |
| WSSD | World Summit on Sustainable Development |
| z.B. | Zum Beispiel |