

Abschlussbericht

DIONA

Projektlaufzeit: 01.10.2022 – 31.12.2025



PTKA
Projektträger Karlsruhe
Karlsruher Institut für Technologie



**Bundesministerium
für Forschung, Technologie
und Raumfahrt**



Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	1
Tabellenverzeichnis	3
Abbildungsverzeichnis	4
1 Forschungsaufgaben von DIONA.....	6
1.1 Kreislaufwirtschaft in der Automobilindustrie	6
1.2 MobilKreis-Projekte und das DIONA-Konsortium	7
1.2.1 MobilKreis.....	7
1.2.2 Konsortium und Aufgaben von DIONA.....	8
1.3 DIONAs Mission.....	10
2 Ausgangspunkt.....	12
2.1 Nachhaltiger soziotechnischer Wandel	12
2.1.1 Geschäftsprozesse.....	12
2.1.2 Geschäftsmodelle	13
2.2 Datenräume	14
2.3 Simulation	15
3 Gestaltungsfelder Kreislaufwirtschaft.....	17
3.1 Schließung von Kreisläufen.....	17
3.1.1 Datengetriebene Nachhaltigkeit	17
3.1.2 Handlungsempfehlungen für eine nachhaltige Kreislaufwirtschaft	31
3.2 Schaffung von Handlungsräumen.....	37
3.2.1 Best Practices zur Geschäftsmodellentwicklung	37
3.2.2 Geschäftsmodellerstellung	42
3.3 Durchgängige Informationsbereitstellung	58
3.3.1 Technologieradar für eine durchgängige Digitalisierung	58
3.3.2 Digital Twin basiertes Industrial Metaverse	62
3.3.3 Entscheidungsmodell zur Technologieauswahl.....	65
4 Werkzeugbaukästen Kreislaufwirtschaft.....	77
4.1 Werkzeugbaukasten Anwendungsbeschreibung	77
4.1.1 Konzeptionalisierung von Anwendungsbeschreibungen	77
4.1.2 Anwendungslandkarte für die Kreislaufwirtschaft.....	79
4.2 Werkzeugbaukasten Anwendungsvalidierung	81
4.2.1 Konzeptionalisierung Anwendungsvalidierung	82
4.2.2 Archetypen von Nachhaltigkeitsindikatoren	86
4.2.3 Reifegrad- und Vorgehensmodell zur Ermittlung von Zirkularitätsstufen	90
4.2.4 Design-Prinzipien für Validierungs- und Verifikationstechniken.....	94
5 Cyber-physische Labore.....	102
5.1 Theoretische Grundlagen	102
5.2 Konzeption und Aufbau eines cyberphysischen Labors.....	103
5.2.1 Physische Repräsentation	105
5.2.2 Digitale Repräsentation	107
5.3 Betrieb des cyberphysischen Labors.....	111

5.3.1 Workshopformate	111
5.3.2 Herausforderungen.....	113
5.3.3 Weiterentwicklung des CPL und der Workshops	114
5.3.4 Auswertung der Workshops.....	116
5.3.5 Fazit und Ausblick.....	119
6 Transfer und Vernetzung	121
6.1 Transferkonzept.....	121
6.2 Veranstaltungen	125
6.2.1 MobilKreis-Tagungen.....	126
6.2.2 Weitere Veranstaltungen.....	132
6.3 Veröffentlichungen.....	135
6.4 MobilKreis Hub.....	141
6.4.1 Planung des Hubs	141
6.5 Inhalte des Hubs.....	142
6.5.1 Rahmenwerk für den Mobilkreis-Hub	142
6.5.2 Auswertung und Learnings.....	149
6.6 Website und Social Media Auftritt.....	153
6.6.1 Website von DIONA und MobilKreis.....	153
6.6.2 LinkedIn.....	154
7 Perspektiven und Herausforderungen der Kreislaufwirtschaft.....	157
Literaturverzeichnis.....	158

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Nachhaltigkeitsdaten – Datenobjekte, Beispielattribute und Zuordnung zu TBL-Dimensionen nach Guennoun et al. (2024)	17
Tabelle 2: Two-Step-Clusteranalyse der R-Strategien	34
Tabelle 3: Übersicht der fünf identifizierten Archetypen	39
Tabelle 4: Handlungsempfehlungen	47
Tabelle 5: After-Sales- und Rückführungslogistikprozesse	49
Tabelle 6: Hauptvariablen in TOE-Systematik	53
Tabelle 7: Methodenfragmente	53
Tabelle 8: Zuordnungsmatrix	54
Tabelle 9: Übersicht über daten- und plattformbasierte Geschäftsmodelle in der Kreislaufwirtschaft	57
Tabelle 10: Anforderungen für Data Spaces im Industrial Metaverse	61
Tabelle 11: Designprinzipien für Data Spaces im Industrial Metaverse	63
Tabelle 12: Übersicht über Governance- und Souveränitätsaspekte	64
Tabelle 13: Funktionen von digitalen Technologien in der CE	67
Tabelle 14: Erstellung des Entscheidungsmodells	68
Tabelle 15: Taxonomie für die Gestaltung von After-Sales Prozessen in der Automobilindustrie	75
Tabelle 16: Situative Einflussfaktoren nach TOE-Dimensionen	78
Tabelle 17: Zusammenfassung der sechs Nachhaltigkeitsarchetypen	86
Tabelle 18: Stakeholder-Anforderungserfassung	89
Tabelle 19: Darstellung der Reifegradstufen und ihre dazugehörigen Prozentwerte	94
Tabelle 20: Fragebogen zur Datensammlung bezüglich der Nutzung und Einschätzung von V&V in Unternehmen.	95
Tabelle 21: Finales Indikatorenset	98
Tabelle 22: Exemplarischer Auszug aus dem Anforderungskatalog	109
Tabelle 23: Ergebnisse der Nachbefragung	119
Tabelle 24: Veröffentlichungen aus DIONA	135
Tabelle 25: Übersicht zum Mobilkreis-Projekt DiNaPro	143
Tabelle 26: Spezifikationen und Zielsetzungen des Hubs	145

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Konsortium von DIONA.....	9
Abbildung 2: DIONAs Mission.....	10
Abbildung 3: Architektur eines Datenraumes, Quelle: (International Data Spaces Association 2023)	15
Abbildung 4: Simulationsvorgehensmodell nach (Rabe et al. 2008).....	16
Abbildung 5: Informationsfluss, Datenverwendung und Probleme der Lieferkette.....	19
Abbildung 6: Drei Dimensionen der Nachhaltigkeit nach (Purvis et al. 2019).....	22
Abbildung 7: Aggregiertes Nachhaltigkeitsverständnis für Individuen und Unternehmen.....	25
Abbildung 8: Handlungsempfehlungen zur Teilnahme an der automobilen Kreislaufwirtschaft.....	27
Abbildung 9: Maßnahmen der automobilen Kreislaufwirtschaft.....	30
Abbildung 10: Taxonomie zur Beschreibung datengetriebener zirkulärer Geschäftsmodelle.....	38
Abbildung 11: Smart Circular Canvas.....	41
Abbildung 12: Übersicht der Einflussfaktoren.....	43
Abbildung 13: Wertschöpfungskreislauf nach Eisenreich (Eisenreich et al. 2022).....	48
Abbildung 14: Überblick zur 5-Diamonds Methode.....	51
Abbildung 15: Vorgehensmodell.....	55
Abbildung 16: Übersicht über die Potenziale von Data Spaces in Bezug auf die Nachhaltigkeit und Kreislaufwirtschaft.....	59
Abbildung 17: Referenzarchitektur für Data Spaces im Industrial Metaverse.....	61
Abbildung 18: Digitale Technologien für nachhaltige Lieferketten.....	65
Abbildung 19: Technologieradar.....	66
Abbildung 20: Potenziale und Barrieren des Metaverse für die Kreislaufwirtschaft.....	67
Abbildung 21: Entscheidungsmodell zur Technologieauswahl.....	70
Abbildung 22: GPM-System für die Kreislaufwirtschaft.....	73
Abbildung 23: DIKW-Hierarchie mit digitalen Technologien.....	74
Abbildung 24: Geschäftsprozessmanagementsystemarchitektur für die Kreislaufwirtschaft.....	76
Abbildung 25: Die Taxonomie für Anwendungsfälle in der Kreislaufwirtschaft (morphologische Box).....	78
Abbildung 26: Anwendungslandkarte.....	80
Abbildung 27: Konfigurationsmechanik.....	81
Abbildung 28: Ergebnisse Best-Practices differenziert in sechs Dimensionen.....	83
Abbildung 29: Taxonomie zur Bildung von Nachhaltigkeitsindikatoren.....	85
Abbildung 30: Bewertung des Transformationsprozesses zur Zirkularität entlang der Wertschöpfungskette.....	92
Abbildung 31: Vorgehensmodell zur kontinuierlichen Anwendung des Reifegradmodells.....	93
Abbildung 32: Zuordnung Indikatoren anhand der TBL.....	98
Abbildung 33: Praxisnahe Systemlandschaft (Rau et al. 2025).....	100
Abbildung 34: Weiterführung des Prozessmodells (Rau et al. 2025).....	101
Abbildung 35: Explosionsmodell eines PEM-Brennstoffzellenstack vom Typ OSS50.....	105
Abbildung 36: Kreislauf-Map mit Exponaten aus dem Bereich der Brennstoffzellen.....	105
Abbildung 37: Brennstoffzellen-Fahrzeug auf Allrad-Rollenprüfstand.....	106
Abbildung 38: Messekoffer zum mobilen Aufbau des CPL.....	106
Abbildung 39: Grundsätzlicher stationärer und mobiler Aufbau des CPL.....	107
Abbildung 40: Cylab Manager.....	107
Abbildung 41: Aufbau des CPL.....	108
Abbildung 42: Makroebene des hybriden Simulationsmodells.....	110
Abbildung 43: Ausschnitt der hybriden Simulation eines Lebenszyklus einer Wasserstoffbrennstoffzelle.....	110
Abbildung 44: Angeregter Austausch am Komponenten-Tisch während eines Grundlagen-Workshops (Fotograf: Georgiy Kupenskiy).....	112
Abbildung 45: Mögliche Dichtungskonzepte zum Anfassen und selbst montieren.....	113
Abbildung 46: Beispielhafter Auszug aus einem Miro-Board zum Workshop „Wertschöpfung in der Kreislaufwirtschaft“.....	114
Abbildung 47: Das cyberphysische Labor an der TU Chemnitz als Beispiel für die digitale 360° Umsetzung der MobilKreis-Projekte.....	115
Abbildung 48: Vertrautheitsgrad der Workshop-Teilnehmenden mit dem Konzept der Kreislaufwirtschaft.....	117

Abbildung 49: Angewandte R-Strategien der Unternehmen der Teilnehmenden	117
Abbildung 50: Nachbefragung Zufriedenheit mit den Workshops.....	118
Abbildung 51: Prozess des Wissenstransfers in Anlehnung an (Rauter 2013)	121
Abbildung 52: Positionierung DIONA	123
Abbildung 53: Überblick Stakeholder DIONA.....	124
Abbildung 54: Anteil der Mobilkreisprojekte am Gesamtkonsortium.....	143
Abbildung 55: Kernproblematiken der MobilKreis-Projekte in der Forschung	144
Abbildung 56: Taxonomie zu Innovations-Hubs	145
Abbildung 57: Komponentensicht der Referenzarchitektur.....	146
Abbildung 58: Funktionsbereiche der Referenzarchitektur	146
Abbildung 59: Kollaborationslebenszyklus nach (Tellioglu)	147
Abbildung 60: Kollaborationslebenszyklus für den Mobilkreis-Hub	148
Abbildung 61: Nutzeraktivität.....	150
Abbildung 62: Beteiligung an Likes.....	150
Abbildung 63: Vergleich durchschnittlicher Likes.....	151
Abbildung 64: Likes insgesamt und auf Nutzerbasis.....	151
Abbildung 65: Häufigkeit der Inhaltstypen	152
Abbildung 66: Communication Roadmap.....	154
Abbildung 67: LinkedIn DIONA Account (Stand Januar 2026)	155

1 Forschungsaufgaben von DIONA

1.1 Kreislaufwirtschaft in der Automobilindustrie

Neben den geopolitischen und humanitären Krisen schreiten im Hintergrund der menschenverursachte Klimawandel, die Umweltverschmutzung und Überkonsum kontinuierlich voran. Um der wachsenden Kluft zwischen Ressourcennutzung durch die Menschheit und den planetaren Grenzen entgegenzuwirken, ist entschlossenes Handeln notwendig (Umweltbundesamt, 2021a). Seit der Verabschiedung der Agenda 2030 und des Pariser Klimaschutzabkommens besteht ein internationaler Konsens darüber, dass Wachstum und Wohlstand künftig vom Ressourcenverbrauch entkoppelt werden müssen (UNFCCC; United Nations 2015a). Vor dem Hintergrund der Herausforderungen des aktuellen globalen Wirtschaftssystems, insbesondere im Hinblick auf den Ressourcenverbrauch und die begrenzten planetaren Kapazitäten, stellt der Übergang zu nachhaltigen Produktions- und Konsummustern einen zentralen Bestandteil dieser Zielsetzung dar. Als Konsequenz zählt die Gestaltung des Transformationsprozesses von einer linearen zu einer kreislaforientierten Wertschöpfung zu den zentralen Aufgaben einer nachhaltigen Industriepolitik. Insbesondere die großen Volkswirtschaften und Industrienationen tragen eine wesentliche Verantwortung für diesen Übergang (UNFCCC; United Nations 2015a).

Trotz dieser Zielsetzungen bleibt der Handlungsdruck hoch: Der weltweite Ressourcenverbrauch nimmt weiterhin zu, während die Kreislaufwirtschaft bislang nur einen vergleichsweise geringen Anteil der eingesetzten Materialien wieder in den Wirtschaftskreislauf zurückführt. Auch in Deutschland verfehlt insbesondere der Verkehrssektor seine Klimaziele deutlich (Umweltbundesamt, 2025a).

Kreislaufwirtschaft (Englisch „circular economy“, CE) gilt als eines der vielversprechendsten Paradigmen für die Neugestaltung globaler Lieferketten und Netzwerke (Aguilar Esteva et al. 2021; Elia et al. 2020; Upadhyay et al. 2023). Im Gegensatz zum noch immer prägenden linearen Wirtschaftsmodell zielt CE darauf ab, den Umgang mit Ressourcen zu optimieren und den Lebenszyklus durch Strategien wie Wiederverwendung, Recycling und Wiederaufarbeitung zu verlängern (Ellen MacArthur Foundation 2013; Geissdoerfer et al. 2017). Die wissenschaftliche Literatur beschreibt die CE als Entwicklungsstrategie, die Wirtschaftswachstum vom Ressourcenverbrauch entkoppelt und gleichzeitig Wertschöpfung, Beschäftigung und Innovation fördert (Lehmacher und Bödecker 2023). Grundlage bildet das Prinzip der geschlossenen Stoffkreisläufe, in denen Produkte so konzipiert sind, dass sie am Ende ihres Lebenszyklus repariert, wiederverwendet oder stofflich verwertet werden können (Förtsch und Meinholz 2023). Dieser systemische Ansatz fördert und erfordert es, dass Akteure verschiedener Branchen zusammenarbeiten und Ressourcen austauschen (Ferreira et al. 2023).

Das 9R-Rahmenwerk nach (Kirchherr et al. 2017) dient als analytischer Bezugspunkt und differenziert zwischen Strategien der Vermeidung (Refuse, Rethink, Reduce), der Werterhaltung (Reuse, Repair, Refurbish, Remanufacture, Repurpose) und der Rückgewinnung (Recycle, Recover). In der industriellen Praxis bedeutet dies, dass Unternehmen sowohl auf Produktebene als auch entlang ihrer Prozesse neue Formen der Material- und Informationssteuerung implementieren müssen.

Die Automobilindustrie zählt weltweit zu den größten Industriezweigen und stellt in Deutschland den bedeutendsten Industriezweig dar (Fuchs und Westermeyer 2023). Zugleich ist die Branche durch einen hohen Material- und Energieeinsatz gekennzeichnet (Osann et al. 2021; Kraft et al. 2022). Die Materialvielfalt moderner Fahrzeuge, ihre komplexen Lieferketten und langen Lebenszyklen erfordern ganzheitliche Ansätze, während bislang nur ein Teil der eingesetzten Metalle und Kunststoffe tatsächlich im Kreislauf verbleibt (Kraft et al. 2022). Bestehende Produktions- und Nutzungsstrukturen führen damit zu erheblichen Ressourcenverlusten und begrenzen die ökologische Effizienz des Sektors (Osann et al. 2021).

Die Automobilindustrie steht damit vor einer doppelten Herausforderung: Sie gilt einerseits als Schlüsselsektor für Beschäftigung, Innovation und Exportleistung, andererseits als einer der größten

Verursacher von Emissionen und Ressourcenverbrauch. Die Verbindung von Mobilitätswende und Rohstoffwende rückt ins Zentrum aktueller Forschungs-, Industrie- und Politikinitiativen. Der Wandel zur Elektromobilität bringt zwar Chancen zur Dekarbonisierung, erfordert aber zugleich neue Lösungen für Rohstoffabhängigkeiten, Materialkreisläufe und Second-Life-Konzepte für Batterien. Der Umgang mit Altbatterien, seltenen Erden und Leichtbauwerkstoffen zeigt, dass lineare Verwertungsstrukturen an ihre Grenzen stoßen (Gall et al. 2021).

Vor diesem Hintergrund ist auch die Nachhaltigkeitsstrategie der Bundesregierung auf CE ausgerichtet und zielt auf eine Entkopplung von Konsum und Wachstum ab (German Federal Government 2021). Auch die Europäische Union hat diesen Anspruch im „European Green Deal“ und im „Circular Economy Action Plan“ konkretisiert. Für die Automobilindustrie entsteht daraus die Notwendigkeit, sämtliche Phasen des Produktlebenszyklus ressourceneffizient und emissionsmindernd zu gestalten – von der Herstellung über den Gebrauch bis zur stofflichen Wiederverwertung. Mit der geplanten EU-Verordnung zu zirkulären Anforderungen an Fahrzeugdesign und End-of-Life-Management (European Commission 2024) sowie der Batterien-Verordnung (EU 2023/1542) wurden erstmals verbindliche Maßstäbe für Design-for-Circularity, Rücknahme, Recycling und den Einsatz von Sekundärmaterialien verabschiedet (European Union 2023).

Die Umsetzung CE-Strategien in der industriellen Praxis ist untrennbar mit der Digitalisierung verbunden. Nur wenn Daten zu Materialien, Komponenten und Nutzung über Unternehmensgrenzen hinweg verfügbar sind, lassen sich geschlossene Kreisläufe technisch und wirtschaftlich realisieren. Der digitale Produktpass, der zunächst für Traktionsbatterien eingeführt wird, bildet dabei einen zentralen Baustein, um Datenflüsse über den gesamten Produktlebenszyklus hinweg zu verknüpfen (Rizos und Urban 2024). Durch die Rückverfolgbarkeit von Materialien, Komponenten und CO₂-Bilanzen entstehen neue Möglichkeiten für Transparenz und Nachweisführung in Wertschöpfungsketten. Digitale Zwillinge und interoperable Datenräume bilden hier weitere zentrale Enabler (Ellen MacArthur Foundation 2024). Plattformen wie Catena-X oder vergleichbare europäische Datenräume schaffen in diesem Zusammenhang technische und organisatorische Grundlagen für digitale Ökosysteme der CE (Digitale Industrie Österreich, 2024).

Gerade für kleine und mittlere Unternehmen (KMU) der Automobilzulieferindustrie stellt die Teilnahme an solchen digitalen Ökosystemen jedoch eine besondere Herausforderung dar. Ihnen fehlen häufig die personellen, finanziellen und technologischen Ressourcen, um die erforderlichen Dateninfrastrukturen aufzubauen, regulatorische Anforderungen eigenständig umzusetzen und zirkuläre Geschäftsmodelle zu entwickeln. Ohne gezielte Unterstützung droht eine Kluft zwischen den politischen Zielsetzungen und der betrieblichen Realität in der Breite der Zulieferindustrie.

Das Projekt DIONA setzte genau an dieser Schnittstelle zwischen ökologischer Notwendigkeit, technologischer Machbarkeit und organisatorischer Umsetzbarkeit an. Ausgangspunkt war die Erkenntnis, dass technologischer und wirtschaftlicher Fortschritt langfristig nur gewährleistet werden kann, wenn er mit einem nachhaltigen Umgang mit natürlichen Ressourcen vereinbar ist – und dass die dafür notwendige zirkuläre Transformation ohne digitale Infrastrukturen und überbetriebliche Zusammenarbeit nicht gelingen kann. Die Zielstellung war es, diesen Wandel wissenschaftlich, technologisch und organisatorisch durch den Aufbau eines digitalen Ökosystems zu unterstützen, um insbesondere KMU der Automobilzulieferindustrie in die Lage zu versetzen, CE praktisch umzusetzen. DIONA verband dabei wissenschaftliche Erkenntnisse, digitale Werkzeuge und praxisorientierte Transferformate, um ein Umfeld zu schaffen, in dem nachhaltige Produktions- und Geschäftsmodelle erprobt, bewertet und weiterentwickelt werden können. Auf diese Weise trug das Projekt dazu bei, die Lücke zwischen politischen Zielsetzungen, wissenschaftlichen Erkenntnissen und betrieblicher Realität zu schließen und die zirkuläre Transformation der Automobilindustrie zu fördern.

1.2 MobilKreis-Projekte und das DIONA-Konsortium

1.2.1 MobilKreis

Die vom Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt (BMFTR, ehemals Bundesministerium für Bildung und Forschung, BMBF) geförderte Maßnahme „MobilKreis – Auf dem Weg zur nachhaltigen Mobilität durch kreislauffähige Wertschöpfung“ war Teil des Programms „Zukunft der Wertschöpfung – Forschung zu Produktion, Dienstleistung und Arbeit“ und umfasste außerdem Projekte aus der Hightech-Strategie „Forschung und Innovation für die Menschen“. Ziel war

die Schaffung wissenschaftlicher, technologischer und organisatorischer Grundlagen für eine ressourceneffiziente, klimaneutrale und zirkuläre Mobilität. Im Mittelpunkt standen die Entwicklung und Erprobung neuer Konzepte, Technologien und Organisationsformen, die eine Transformation von linearen Produktions- und Nutzungssystemen hin zu geschlossenen Wertschöpfungsketten in der Automobil- und generellen Mobilitätsbranche ermöglichen.

Die Maßnahme MobilKreis zeichnete sich durch einen modularen Aufbau aus, der eine Vielzahl von MobilKreis-Projekten, auch Verbundprojekte genannt, umfasste. Diese Projekte waren inhaltlich eigenständig und beschäftigten sich mit unterschiedlichen wissenschaftlichen Fragestellungen der CE, beispielsweise der Entwicklung digitaler Produktpässe, der Gestaltung nachhaltiger Geschäftsmodelle, der Implementierung von Remanufacturing-Prozessen oder der Bewertung und Optimierung der Nachhaltigkeit von Kunststoff-Werkstoffkreisläufen.

1.2.2 Konsortium und Aufgaben von DIONA

Zur strukturellen und inhaltlichen Vernetzung der Verbundprojekte sowie zum Wissenstransfer wurde das Begleitforschungsprojekt DIONA initiiert. Das Projekt bildete eine Metaebene, auf der die Ergebnisse der Verbundprojekte konsolidiert, analysiert und in einen strategischen Gesamtzusammenhang eingebettet wurden. Ziel von DIONA war es, ein digitales und organisatorisches Ökosystem zu etablieren, das den Informationsaustausch, die methodische Zusammenarbeit und den langfristigen Transfer der Ergebnisse aller MobilKreis-Projekte unterstützt. Zu diesem Zweck wurden seitens DIONA Formate und Werkzeuge konzipiert, welche die Vernetzung der unterschiedlichen Akteure aus Wissenschaft, Wirtschaft, Politik und Gesellschaft ermöglichten und gemeinsame Forschungssynergien generierten. Weiterhin unterstützte DIONA durch Forschung zu verschiedenen Themen den Transformationsprozess von Unternehmen in der CE.

Die MobilKreis-Tagungen bildeten dabei das zentrale Präsenzformat des Transferkonzepts. Die Konzeption und Durchführung dieser Tagungen wurde von DIONA übernommen. Ihre Funktion bestand in der Kommunikation wissenschaftlicher Ergebnisse, der Vernetzung der Verbundprojekte untereinander sowie der Öffnung der Forschung in Richtung Industrie, Politik und Öffentlichkeit. Im Rahmen der Tagungen wurden Fortschritte, Herausforderungen und Querschnittsthemen der CE erörtert. Die Ergebnisse wurden über den digitalen MobilKreis Hub (<https://hub.mobilkreis.de/>, verfügbar bis Ende September 2026) dokumentiert und der Öffentlichkeit zugänglich gemacht. Der Hub sollte nicht nur als digitale Infrastruktur fungieren, sondern vielmehr als integratives Ökosystem, welches durch technische, organisatorische und soziale Aspekte relevante Akteure miteinander verbindet.

Das Projektkonsortium von DIONA setzte sich aus mehreren wissenschaftlichen Einrichtungen zusammen, die komplementäre Fachkompetenzen einbrachten und in enger interdisziplinärer Kooperation zusammenarbeiteten. Zu den zentralen Partnern zählten die Technische Universität Dortmund (TU Dortmund), die Technische Universität Chemnitz (TU Chemnitz) und das Fraunhofer-Institut für Software- und Systemtechnik (ISST). Abbildung 1 zeigt das Konsortium von DIONA.



Abbildung 1: Konsortium von DIONA

Das Industrielle Informationsmanagement (IIM) der TU Dortmund bearbeitete im Rahmen von DIONA die Forschungsgebiete Geschäftsmodelle, Ökosysteme und Digitale Zwillinge. Dabei lag ein Fokus auf datengetriebenen Modellen. Durch die Arbeit in DIONA konnte das IIM seine Kompetenzen im Bereich CE ausbauen. Ziel war es, Werkzeuge zu entwickeln, mit denen sich Unternehmen im Kontext von Nachhaltigkeit selbst evaluieren und darauf aufbauend Maßnahmen ableiten können, um sich in Bezug auf die CE zu optimieren. Das IIM verfolgte damit das Ziel, durch seine Beiträge in DIONA die CE in Deutschland, insbesondere in der Automobilindustrie, voranzubringen.

Das Fachgebiet für IT in Produktion und Logistik (ITPL) der TU Dortmund befasste sich mit der Modellierung, Simulation und Optimierung komplexer Produktions- und Logistiksysteme. Im Rahmen von DIONA verfolgte das ITPL das Ziel, Unternehmen bei der Transformation hin zu einer nachhaltigen, kreislaufbasierten Produktion zu unterstützen. Da reale Systeme aufgrund ihrer Komplexität, Dynamik und Interdependenzen für die Erprobung von Maßnahmen zur nachhaltigen Transformation ungeeignet waren, schuf das ITPL in DIONA die Möglichkeit, solche Maßnahmen unter Nutzung von IT-Technologien gemeinsam mit Fachleuten praxisnah zu evaluieren, Erkenntnisse zu gewinnen und Wissen zu vermitteln. Dies entsprach den wissenschaftlichen Schwerpunkten und der Expertise des Fachgebiets im Bereich nachhaltiger Lieferketten.

Das an der Sozialforschungsstelle der TU Dortmund angesiedelte Fachgebiet Techniksoziologie (TSoz) untersuchte im Rahmen des Projekts DIONA den Wandel soziotechnischer Systeme und die Effekte möglicher Governance-Optionen für einen nachhaltigen Wandel. Mithilfe eines breiten Methodenspektrums, zu dem unter anderem Interviews und Befragungen gehörten, befasste sich TSoz mit dem soziotechnischen Wandel zu einer CE in der Automobilindustrie. Dabei standen die Nachhaltigkeitsverständnisse der Mitarbeitenden von KMUs im Fokus, die ihre individuellen Handlungen leiteten und Wandlungsprozesse initiierten oder beeinflussten. Die sozialwissenschaftliche Begleitung der Erprobung von Handlungsoptionen in cyber-physischen Testräumen ergänzte das theoretische Wissen um praxisnahe Erkenntnisse.

Das ISST beschäftigte sich im Rahmen von DIONA mit der Entwicklung von System- und Softwarelösungen für den effizienten Umgang mit Daten. Nachhaltige Konzepte und Softwarelösungen über den gesamten Produktlebenszyklus hinweg gewannen zunehmend an Bedeutung. Erfahrungen aus dem von der Fraunhofer-Gesellschaft getragenen Catena-X Automotive Network, in dem die automobile CE ein Kernelement darstellte, wurden in DIONA eingebracht. Ebenso profitierte DIONA von den Erfahrungen des Fraunhofer ISST beim Aufbau von Hub-Strukturen, die für den MobilKreis Hub eingebracht wurden.

Die Professur Wirtschaftsinformatik – Geschäftsprozess- und Informationsmanagement (WI) – der TU Chemnitz adressierte im Rahmen von DIONA aktuelle Forschungsfragen an der Schnittstelle von digitaler Transformation und CE. Aufbauend auf bisherigen Arbeiten zu digitalen Transformationsprozessen für KMU, Wertschöpfungsnetzwerken, Dienstleistungen für Elektromobilität und Digitalen Zwillingen überführte die Professur ihre Erkenntnisse in die Domäne CE. Im Fokus standen die Analyse und Aufbereitung von Anwendungsfällen der digitalen CE sowie die Ableitung von Anforderungen und Anpassungsbedarfen für Geschäftsprozesse sowie für Geschäftsmodelle von KMU. Zur Verbreitung, Vermittlung und praxisnahen Erprobung der Forschungsergebnisse wurden ein cyberphysisches Labor sowie der MobilKreis Digital Hub konzipiert. Dadurch erhielten KMU und weitere Akteure Zugang zu Anwendungsszenarien der CE sowie zu relevanten Informationen, Methoden und digitalen Unterstützungsangeboten.

Die Professur Alternative Fahrzeugantriebe (ALF) der TU Chemnitz betrieb im Rahmen von DIONA anwendungsnahe Industrieforschung im Bereich wasserstoffbasierter Elektromobilität mit Fokus auf Brennstoffzellentechnologien. Vor dem Hintergrund des globalen Wandels hin zu erneuerbaren Energien untersuchte die Professur die Herausforderungen für die Automobilzuliefererlandschaft sowie den notwendigen Wandel von Produktionssystemen und Unternehmenskulturen. Dabei spielten Themen wie Material- und Ressourcenverfügbarkeit, Lieferkettenprobleme und energetischer Preisdruck eine zentrale Rolle. Ziel der Professur war es, diesen Transformationsprozess aktiv mitzugestalten und Aufklärungsarbeit in der Industrie zu leisten, um kreislauffähige Wertschöpfungsketten zu fördern.

Neben dem Projektkonsortium wurde DIONA durch mehrere assoziierte Partner unterstützt. Diese Partner brachten ergänzende fachliche Perspektiven und Praxisbezüge in die Arbeit von DIONA ein und stärkten so den Transfer zwischen Forschung und Anwendung. Zu den assoziierten Partnern zählten das Mittelstand-Digital Zentrum Ruhr-OWL, DB Schenker, das Centrum for Entrepreneurship & Transfer sowie das Mittelstand-Digital Zentrum Chemnitz. Durch ihre Einbindung konnten Synergien zwischen wissenschaftlicher Forschung und praktischer Anwendung geschaffen und die Wirkung der im Rahmen von DIONA erzielten Ergebnisse in Wirtschaft und Gesellschaft verstärkt werden.

1.3 DIONAs Mission

Wie in den vorherigen Kapiteln bereits erwähnt, war DIONA das Begleitforschungsprojekt des MobilKreis-Verbundes. Die Mission des Projekts bestand darin, die Vernetzung zwischen den Verbundprojekten und weiteren relevanten Stakeholdern zu fördern, den Wissenstransfer untereinander und nach außen zu ermöglichen sowie durch eigene Forschung die zirkuläre Wertschöpfung voranzutreiben. DIONAs Mission, um dies zu erreichen, ist in Abbildung 2 veranschaulicht.

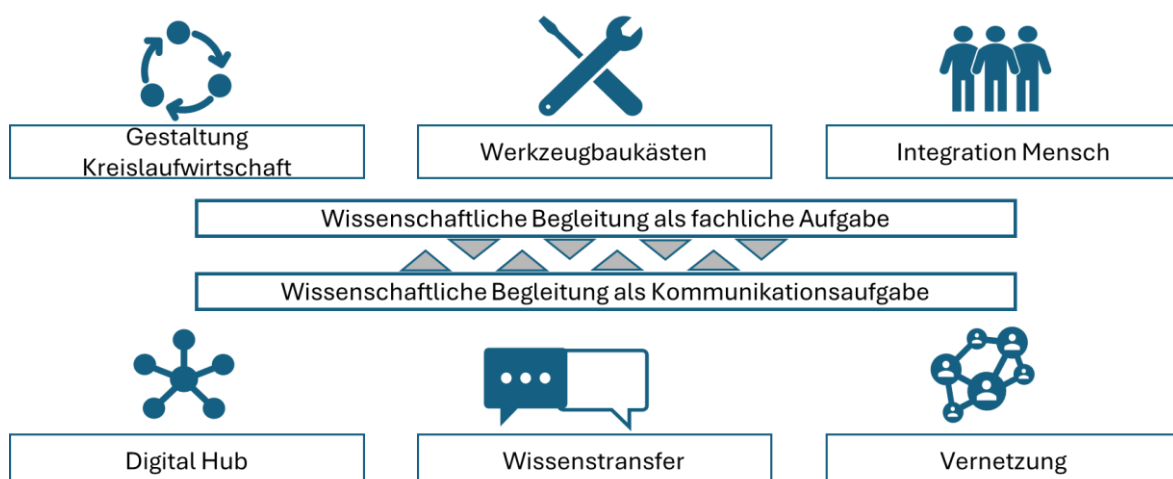


Abbildung 2: DIONAs Mission

Auf bereits vorliegenden Erfahrungen und Erkenntnissen aufbauend, zielte DIONA darauf ab, einen sogenannten MobilKreis Digital Hub (kurz MobilKreis Hub) zur kreislauffähigen Wertschöpfung aufzubauen. Infolgedessen sollte der MobilKreis Hub als Anlaufstelle und Innovationszentrum für

relevante Akteure aus Wissenschaft, Wirtschaft, Verbänden, Sozialpartnern und Gremien fungieren und die interdisziplinäre Zusammenarbeit fördern.

Mit klarem Fokus auf die kreislauffähige Wertschöpfung in der Automobilindustrie verfolgte das Projekt das Ziel, wesentliche Erkenntnisse aus den im Rahmen der Bekanntmachung „MobilKreis“ geförderten Verbundprojekten zu synthetisieren, um in Unternehmen anwendungsnahe Methoden und Werkzeuge verfügbar zu machen. Hierbei wurde eine ganzheitliche Vorgehensweise angestrebt, bestehend aus den vier Arbeitsgebieten „Gestaltungsfelder KW“, „Transfer, Vernetzung und MobilKreis-Digital-Hub“, „Werkzeugbaukästen KW“ und „Cyber-physische Labore“.

Das Arbeitsgebiet „Gestaltungsfelder“ orientierte sich an den in der Bekanntmachung „MobilKreis“ definierten Elementen „Handlungsspielräume“, „Kreisläufe verengen“ und „digitale Durchgängigkeit“. Ein Ziel dieses Arbeitsgebiets war der Aufbau eines umfassenden Verständnisses des Nachhaltigkeitsbegriffs, insbesondere mit Bezug zu den Verbundprojekten und der zukünftigen Ausgestaltung der CE. Darüber hinaus wurde das Verständnis der soziotechnischen Implikationen in der Adaption einer nachhaltigen CE untersucht. Ebenso adressierte dieses Arbeitsgebiet die durchgängige Digitalisierung in geschlossenen Wertschöpfungskreisläufen.

Das zweite Arbeitsgebiet „Transfer, Vernetzung und Mobilkreis-Digital-Hub“ widmete sich dem Aufbau und Betrieb des MobilKreis Hubs. Dieser informierte über Veranstaltungen (z. B. Treffen, Workshops, Tagungen), aktiver Vernetzung (Kontaktvermittlung, Internetauftritte), der Generierung wissenschaftlicher Reichweite (z. B. Whitepaper, Publikationen) sowie weiterem Ergebnistransfer. Um Lösungen zu schaffen, diente der MobilKreis Hub als Inkubator für innovative und praxisnahe Entwicklungen sowie Handlungsmaßnahmen.

Das dritte Arbeitsgebiet „Werkzeugbaukästen KW“ konzentrierte sich auf die Entwicklung und Zusammenstellung eines Methoden- und Werkzeugbaukastens auf Grundlage einer Metastudie und wissenschaftlicher Artefakte. Ziel war es, Handlungsempfehlungen für eine nachhaltige Wertschöpfung zu konzipieren. Ein Beispiel hierfür war die Erstellung eines Reifegradmodells zur Selbstevaluierung. Durch diese Selbstevaluierung sollten insbesondere KMU ihre Kreislauffähigkeit reflektieren können, um das Bewusstsein für nachhaltiges Handeln zu stärken. Dies befähigte sie, Potenziale eigenständig zu erkennen und entsprechende Aktivitäten zu initiieren.

Im vierten Arbeitsgebiet „Cyber-physische Labore“ wurden offene, cyber-physische Test- und Experimentierräume in Betrieb genommen und betrieben. Diese zeichneten sich durch den Verbund informatischer und softwaretechnischer Komponenten aus. Die Laborumgebungen ermöglichten es, Szenarien und Lösungen der Anwenderinnen und Anwender durchzuführen, ohne reale Abläufe zu stören. Sie stellten somit ein Angebot für die Verbundprojekte und weitere Interessierte dar, mit dem sie selbstständig potenzielle Lösungen oder Ansätze simulieren und validieren konnten. Während der Projektlaufzeit wurden die cyber-physischen Labore iterativ an neue Bedürfnisse der verschiedenen Anwendergruppen angepasst.

2 Ausgangspunkt

2.1 Nachhaltiger soziotechnischer Wandel

Eine nachhaltige Transformation ist insofern ein neuartiges Phänomen, als aufgrund des erwarteten Überschreitens planetarer Grenzen (z. B. Klimawandel) ein gerichteter gesellschaftlicher Wandel angestrebt wird. Dabei sind jedoch sowohl das Konzept der Nachhaltigkeit als auch das der Transformation nicht eindeutig bestimmt und können daher als „essentially contested concepts“ (Gallie 1955) verstanden werden – also Konzepte, die von einer Vielzahl gesellschaftlicher Akteure verfolgt, aber unterschiedlich interpretiert werden. Aus diesem Grund ist eine differenzierte Auseinandersetzung mit den verschiedenen Konzepten und Zielvorstellungen in einem nachhaltigen Wandlungsprozess unvermeidlich (Christ und Sommer 2022).

Ebenso gilt es, die Ziele eines nachhaltigen Wandels der unterschiedlichen Akteure zu identifizieren: Handelt es sich um Vorstellungen einer „grünen Modernisierung“, also um einen Wandel, der mit bestehenden gesellschaftlichen Strukturen und Wirtschaftssystemen vereinbar ist? Oder geht es vielmehr um eine tiefgreifende Transformation, die auch Fragen eines gerechten Zusammenlebens in den Vordergrund stellt (Adloff und Neckel 2019)?

Technik wird in nachhaltigen Transformationsprozessen häufig als Lösung vieler Probleme angesehen; hierbei ist es jedoch essenziell, Technik nicht allein als physisches Konstrukt zu betrachten. Denn Technik erhält erst durch die Nutzung und Interpretation des Menschen ihre Bedeutung. Gleichzeitig beeinflusst sie den Menschen durch ihre Existenz und die daraus entstehenden neuen Handlungsoptionen. Daher ist es notwendig, eine ganzheitliche, systemische Perspektive einzunehmen, welche sowohl technische als auch soziale und politische Aspekte integriert – hier wird von soziotechnischen Systemen gesprochen (Weyer 2008).

Darüber hinaus ist auch die spezifische Untersuchung gesellschaftlicher Wandlungsprozesse im Rahmen der Analyse von soziotechnischen Systemen fruchtbar. Esser (1999) unterscheidet diesbezüglich zwischen einer Makro- und einer Mikroebene: Die vorherrschenden gesellschaftlichen Strukturen zu einem Zeitpunkt t beeinflussen die Handlungskontexte jedes Individuums auf der Mikroebene; diese reagieren innerhalb ihres jeweiligen Handlungsspielraums und schaffen dadurch neue Phänomene auf der Makroebene. Im gesellschaftlichen Kontext wählt das Individuum die subjektiv als beste wahrgenommene Handlung. Die aggregierten Aktionen aller Individuen ergeben dann den nächsten makroskopischen Systemzustand. Derartige Heuristiken helfen dabei, gesellschaftliche Transformationsprozesse – wie den hin zu einer nachhaltigen Gesellschaft – detailliert zu verstehen sowie Ansatzpunkte und Hemmnisse einer erfolgreichen Transformation zu erkennen.

Um den zukünftigen nachhaltigen Wandel der CE in der Automobilindustrie zu verstehen, ist es zusammenfassend unumgänglich, geeignete Heuristiken und Konzepte anzuwenden. Diese können durch eine intensive soziologische Forschung im Rahmen von DIONA weiterentwickelt werden und tragen dazu bei, politischen und wirtschaftlichen Entscheidungsträgern über den MobilKreis-Digital-Hub ein ganzheitliches Verständnis sowie mögliche Lösungsstrategien näherzubringen.

2.1.1 Geschäftsprozesse

Mit der zunehmenden Komplexität kreislauffähiger Geschäftsprozesse und steigenden Compliance-Anforderungen der EU wächst der Druck auf Unternehmen, ihre Prozesskompetenzen und digitale Infrastrukturen zu erweitern (Losa 2025). Dabei rücken nicht nur ökologische Zielsetzungen, sondern auch die Lieferkettenresilienz und die Begrenzung der Abhängigkeit von Primärrohstoffen, wie zum Beispiel von den chinesischen seltenen Erden, in den Vordergrund (Hosseini Shekarabi et al. 2025). Dieser Wandel, der die komplexe Wiederwertung von Gütern betrifft, erfordert einen hohen Informationsbedarf und Automatisierungsgrad, der durch das Geschäftsprozessmanagement (GPM) adressiert wird. Geschäftsprozesse definieren, wie unternehmerische Ressourcen miteinander verflochten sind und verknüpfen unternehmerische Aktivitäten in logische Einheiten. Das GPM untersucht dabei inwieweit Geschäftsprozesse hinsichtlich vordefinierter Leistungsziele, wie beispielsweise CE-Ziele, verbessert werden können (Schmelzer und Sesselmann 2020).

Die Gestaltung der Geschäftsprozesse war bisher stark durch das Motiv der Kostenoptimierung geprägt (Grisold et al. 2022). Der internationale Wettbewerb, der durch die zunehmende Globalisierung intensiviert wurde, und die damit einhergehenden Niedrigpreisorientierung, hat die Gestaltung der Lieferketten stark beeinflusst (acatech 2016). Die Niedrigpreisorientierung wirkte sich entlang der Kettenglieder der Lieferketten aus, wodurch Original Equipment Manufacturers (OEMs) sich oft gezwungen fühlten, kostengünstige Geschäftsprozesse, Infrastrukturen und prekäre Lieferanten zu nutzen. Endkonsumenten waren die vorgelagerten Schritte der Lieferkette unbewusst und waren nicht für die Schädlichkeit der Niedrigpreisorientierung sensibilisiert. Mit dem Fortschritt von Informationstechnologien wie beispielsweise Social Media hat sich das öffentliche Bewusstsein hierzu jedoch geändert. Auch die Automobilindustrie ist von diesem Wandel betroffen und untersucht, inwieweit CE-Prinzipien in die Geschäftsprozesse integriert werden können.

Das Design der Geschäftsprozesse wird typischerweise von dem Geschäftsmodell und den verfügbaren unternehmerischen Ressourcen abgeleitet. Im Kontext der CE muss daher erarbeitet werden, (1) welche Geschäftsprozesse die nachhaltige Wiederverwertung fördern, (2) welche Muster und Technologien in kreislauffähigen Geschäftsprozessen wiederzufinden sind, die die Anforderungen des Geschäftsmodells erfüllen, (3) welche Leistungskennzahlen die Wertschöpfung eines Geschäftsprozesses misst, (4) und wie Richtlinien aussehen, um diese Geschäftsprozesse anzupassen.

Als Begleitforschungsprojekt von Mobilkreis ist es das Ziel von DIONA, insbesondere Unternehmen der Automobilbranche zu analysieren. In der Untersuchung stehen dabei digitale Technologien und Compliance-Konzepte im Vordergrund, die die Transparenz, Nachvollziehbarkeit und Messbarkeit von unternehmerischen Entscheidungen hinsichtlich CE unterstützen. Ein weiterer Schwerpunkt der Analyse liegt im Bereich der Redistributionslogistik und des After-Sales-Managements, die sich verstärkt mit der Rückführung und Wiederverwertung von Gütern befassen (Lasch 2023). Zuletzt wurden auch Prozessinnovationsmethoden untersucht, die das GPM auf die nachhaltige Wertschöpfung ausrichten, um Richtlinien für die Anpassung von Geschäftsprozessen zu ermitteln (Rosemann, 2020).

2.1.2 Geschäftsmodelle

Geschäftsmodells mit steigendem Interesse des Internets. Allerdings besteht der grundsätzliche Gedanke eines Geschäftsmodells seit dem Zeitpunkt, als Organisationen begannen, monetäre Werte zu generieren (Teece 2010). Ein Geschäftsmodell beschreibt den Aufbau eines Unternehmens und wie es Wert generiert, diesen an die Kunden liefert und erfasst. In der Regel werden Elemente wie die Preisgestaltung, das Produktangebot, die Produktarchitektur, die Kundenbeziehung und Partnerschaften in einem Geschäftsmodell spezifiziert (Al-Debei et al. 2008).

Die Modellierung und Analyse eines Geschäftsmodells bieten sowohl für Unternehmen als auch für Wissenschaftler Vorteile. Zum einen können Unternehmen ihre Geschäftsstrategie reflektieren und aktiv auf externe Umwelteinflüsse (vorhandene Marktstrukturen, Kunden- und Wettbewerbsverhalten) anpassen. Und zum anderen können sie aufgrund der Analyse der aktuellen Marktstrukturen ein besseres Verständnis, darauf aufbauend ein verbessertes Wertangebot ihres Geschäftsmodells anbieten. (Geissdoerfer et al. 2018) Diese Anpassungen sind aufgrund eines immer komplexeren, dynamischeren und unsicheren werdenden Umfelds wichtig (Al-Debei und Avison 2010).

Wegen des steigenden dynamischen Marktumfelds entstehen immer neue Geschäftsmodelltypen, die sich vom allgemeinen Geschäftsmodell hinsichtlich Aufbaus und Struktur unterscheiden. Auf der einen Seite entwickeln sich digitale Geschäftsmodelle (...), darunter auch datengetriebene Geschäftsmodelle (Hartmann et al. 2016), aufgrund des digitalen Fortschritts stets weiter. Im Vordergrund stehen digitale Technologien und Daten als Kernressource und Kernaspekt des Geschäftsmodells (Hartmann et al. 2016; Engelbrecht et al. 2016). Auf der anderen Seite haben sich aufgrund des steigenden Bedarfs an Umweltschutz nachhaltige und zirkuläre Geschäftsmodelle entwickelt. Zirkuläre Geschäftsmodelle stützen sich auf die Prinzipien der CE (9R-Strategien) und erzielen einen wirtschaftlichen Ertrag mit deren Umsetzung. Diese Geschäftsmodelle zielen darauf ab, ungenutztes Potenzial wirtschaftlich und ressourcenschonend im Sinne des Umweltschutzes auszuschöpfen (Rosa et al. 2019; Linder und Williander 2017; Geissdoerfer et al. 2020)

Um Faktoren wie bspw. steigende Marktanforderungen und schnelllebige Produktlebenszyklen rechtzeitig zu erkennen, ist es relevant, das Geschäftsmodell stetig anzupassen, was mittels der Geschäftsmodellinnovation erfolgt. Geschäftsmodellinnovationen beschreiben die Veränderung des gesamten Geschäftsmodells oder einzelner Elemente und gliedern sich in Start-Ups,

Geschäftsmodelltransformation, Geschäftsmodelldiversifizierung und Geschäftsmodellakquisition. So entwickeln Start-ups von Grund auf neue Geschäftsmodelle, wohingegen die Geschäftsmodelltransformation ein bereits bestehendes Modell in ein neues Modell umwandelt. In der Geschäftsmodelldiversifizierung werden zusätzliche Geschäftsmodelle zu den Bestehenden entwickelt. Die Geschäftsmodellakquisition beschreibt die Integration bestehender Geschäftsmodelle in das Geschäftsmodell (Geissdoerfer et al. 2018).

Bei der Ideengenerierung und Geschäftsmodellentwicklung helfen Werkzeuge und Rahmenwerke für ein verbessertes Verständnis zur Geschäftsmodellinnovation. Ein prominentes Werkzeug ist z. B. das *Business Model Canvas* von Osterwalder und Pigneur (2010) (Hartmann et al. 2016; Osterwalder und Pigneur 2010); das ein Geschäftsmodell in die neun wichtigsten Geschäftsmodellelemente gliedert und ihre Beziehung untereinander aufzeigt. Das Werkzeug ist als vereinfachte Darstellung eines Geschäftsmodells auf einer Leinwand aufgebaut, sodass Personen mit unterschiedlichen Hintergründen ein einheitliches Verständnis für das Geschäftsmodell haben. Zweck dieses Werkzeugs ist es, Alternativen zu kreieren und zu testen sowie bestehende Geschäftsmodelle zu analysieren.

Aufgrund der zunehmenden Dringlichkeit, Nachhaltigkeit in der Unternehmensstrategie zu verankern, steigt der Druck auf Unternehmen, nachhaltige Geschäftsmodellentwicklung über Geschäftsmodellinnovationen umzusetzen. Darüber hinaus entsteht ein neuer Markt, in dem sich insbesondere Start-Ups wegen des erkannten Marktpotenzials ansiedeln. Die Bandbreite von zirkulären Geschäftsmodellen reicht von neuen nachhaltigen biobasierten Stoffen bis zu digitalen zirkulären Lösungen (CIRCULAR REPUBLIC und UnternehmerTUM 2025; Henry et al. 2020). Im Rahmen des Projektes DIONA wird insbesondere dieser neue Markt untersucht, um Geschäftsmodellinnovationen zu beschleunigen. Hierbei sollen auch KMUs, die über kein verschriftlichtes Geschäftsmodell verfügen, befähigt werden, ihr Geschäftsmodell anzupassen und mithilfe der im Projekt DIONA entwickelten Werkzeuge, Strukturhilfen und Handlungsempfehlungen Innovationen zu generieren. Durch die aufbereiteten theoretischen und praktischen Grundlagen sind KMUs in der Lage, ihren eigenen Unternehmensstand zu analysieren, eigene Geschäftsmodelle auf Basis existierender Gestaltungsoptionen zu entwickeln und potenzielle Investoren von ihren Ideen zu überzeugen.

2.2 Datenräume

Datenräume gewinnen für die deutsche Wirtschaft in einer zunehmend von Volatilität, Unsicherheit, Komplexität und Ambiguität (VUCA) geprägten Welt sowie im Kontext von Nachhaltigkeits- und Klimaschutzziele stetig an Bedeutung. Sie bieten vielfältige Ansatzpunkte, um Stoff- und Informationskreisläufe zu schließen, und ermöglichen datengetriebene Dienstleistungen in einem industriell geprägten Datenökosystem, das auf durchgängiger Transparenz basiert. Die kollaborative Nutzung von Daten über Unternehmensgrenzen hinweg ist dabei der Schlüssel, um kreislauffähige Wertschöpfungssysteme zu optimieren und die Resilienz der Wirtschaft gegenüber disruptiven Ereignissen – etwa Lieferkettenausfällen – zu stärken. Eine zentrale Voraussetzung hierfür ist die Wahrung der Selbstbestimmtheit von Individuen und Unternehmen.

Das Konzept der Datenräume setzt daher auf eine dezentrale Organisation der Datenspeicherung, bei der Daten nur auf ausdrücklichen Wunsch mit weiteren Parteien geteilt werden (vgl. Abbildung 3). Dieses Vertrauenselement bildet die Grundlage dafür, dass Unternehmen überhaupt bereit sind, Daten zu teilen und gemeinsam zu nutzen. Ein weiterer wesentlicher Aspekt ist die Datensouveränität, also die Möglichkeit, die Kontrolle über eigene Daten zu behalten, auch wenn diese innerhalb eines gemeinsamen Geschäftsökosystems verwendet werden (Otto 2022). Die Herausforderung besteht darin, dass digitale Daten beliebig oft und ohne Qualitätsverlust vervielfältigt werden können, was eine dauerhafte Kontrolle erschwert. Erst durch technische Systeme in Kombination mit rechtlichen Schutzmechanismen kann die Selbstbestimmtheit über Daten sichergestellt werden. Innerhalb eines solchen geschlossenen Systems lassen sich Vertrauen und Transparenz verlässlich aufbauen.

Eine der zentralen Initiativen zur Gewährleistung von Datensouveränität ist die International Data Spaces Association (IDSA), die 2014 gegründet wurde. Ihr Ziel ist es, den souveränen und sicheren Austausch digitaler Daten zu ermöglichen. Geleitet wird die IDSA von einem Konsortium aus Unternehmen, den Bundesministerien für Bildung und Forschung sowie für Wirtschaft und Energie und weiteren Institutionen. Inzwischen sind über 130 internationale Organisationen in der IDSA organisiert, die den Standard DIN SPEC 27070 (2020) kontinuierlich weiterentwickeln. Im Gegensatz zu zentralistischen Plattformen erprobt der International Data Space (IDS) einen dezentralen

Datenaustausch, bei dem Nutzungsbedingungen direkt zwischen den beteiligten Partnern ausgehandelt werden (International Data Spaces Association 2023; Otto 2021). Große Industrieinitiativen wie Catena-X – Automotive Network, der Mobility Data Space oder das Smart Connected Supplier Network setzen auf diese Referenzarchitektur, die zudem mit den Prinzipien von Gaia-X kompatibel ist. Das Konzept der International Data Spaces stellt derzeit den vielversprechendsten Ansatz für einen sicheren Datenaustausch in dezentral organisierten Ökosystemen dar. Die Referenzarchitektur und zahlreiche Softwarekomponenten des IDS sind Open Source, wodurch sie frei nutzbar und anpassbar sind – ein wichtiger Beitrag zur technologischen Nachhaltigkeit durch Wiederverwendung und Offenheit.

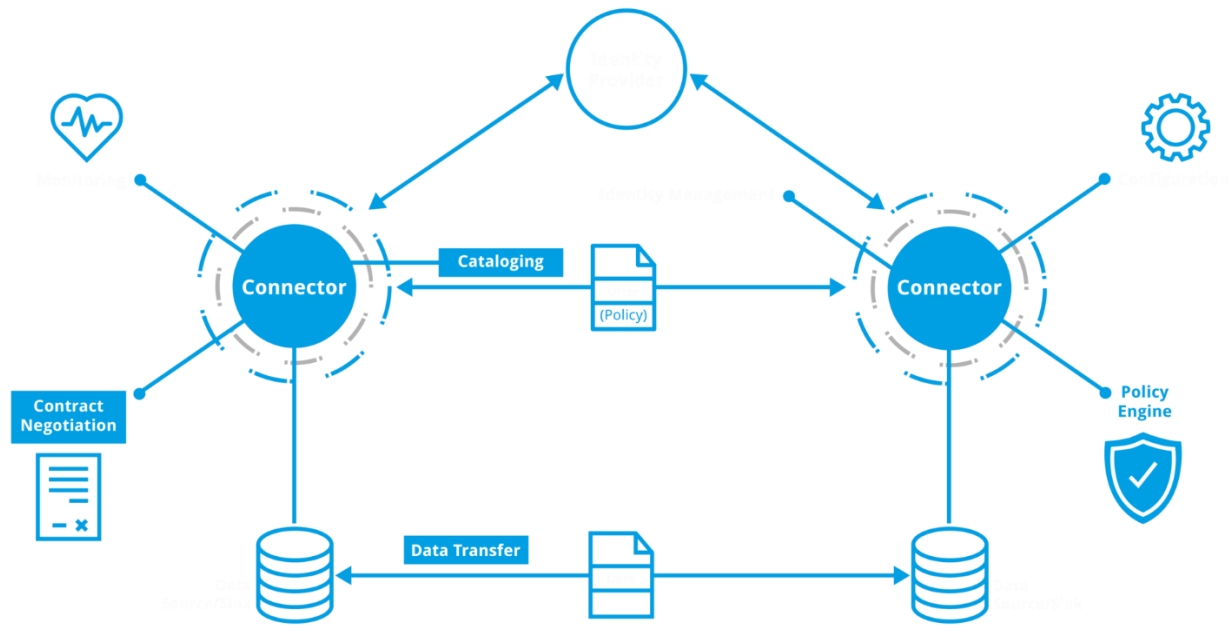


Abbildung 3: Architektur eines Datenraumes, Quelle: (International Data Spaces Association 2023)

2.3 Simulation

Aufgrund steigender Komplexität im Industriekontext hat sich die Simulation als Methode der Analyse, insbesondere im Umfeld der Produktion und Logistik, etabliert (Rabe et al. 2008). Sie eignet sich insbesondere für die Abbildung des stochastischen, dynamischen Verhaltens von Systemen (März und Weigert 2011) und bietet vor diesem Hintergrund eine Reihe von Vorteilen, beispielsweise die Objektivierung im Rahmen einer Entscheidungsfindung oder in der Bewertung von Alternativen (Eley 2012). Sie wird immer dann eingesetzt, wenn neuartige Ansätze verprobt werden, komplexe Zusammenhänge untersucht oder die Grenzen analytischer Methoden erreicht sind (VDI Richtlinie 3633 - 3 1997). Darüber hinaus kommt die Simulation dann zum Einsatz, wenn Untersuchungen an einem Realsystem wirtschaftlich nicht vertretbar sind, beispielsweise aufgrund von Kosten, oder schlicht unmöglich aufgrund technischer Restriktionen oder nicht-Existenz des Realsystems, z. B. in Planungsphasen. Der Einsatzbereich der Simulation im Kontext der Produktion und Logistik erstreckt sich von der Simulation in der Planungsphase, Simulation in der Realisierungsphase bis zur Simulation in der Betriebsphase (VDI Richtlinie 3633 - 1 2014). Somit ist die Simulation hervorragend zur Unterstützung bei der Erprobung und Umstellung neuer Techniken, Systeme und Strategien im Rahmen einer nachhaltigen Transformation hin zur CE geeignet. Sie ermöglicht eine schrittweise und risikoarme Umstellung bspw. bei der Anpassung von Produktionssystemen.

Typischerweise werden Simulationsprojekte durch Vorgehensmodelle beschrieben, welche die notwendigen Aktivitäten strukturieren und in einem Zusammenhang darstellen. Ein zentrales Vorgehensmodell in der etablierten Literatur ist das Modell von Rabe et al. (2008) (siehe Abbildung 4), welches gleichzeitig als Standard im VDI etabliert ist und Grundlage zahlreicher Erweiterungen ist, wie beispielsweise Kuhnt und Wenzel (2010) zeigen. In DIONA wird die Definition aus der VDI Richtlinie 3633 - 1 (2014, S. 3) zugrunde gelegt: „Verfahren zur Nachbildung eines Systems mit seinen dynamischen Prozessen in einem experimentierbaren Modell, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind.“ Diese Definition ist insbesondere im deutschsprachigen Raum

etabliert und deckt sich mit dem Verständnis in der weiteren Literatur, beispielsweise bei Law (2015). Kern ist demnach ein Simulationsmodell, welches aufgrund seiner Ablauffähigkeit eine Analyse in Form von Experimenten ermöglicht (Gutenschwager et al. 2017). Dadurch können Unternehmen befähigt werden, ihre Prozesse und die Auswirkungen von Anpassungen jener besser zu verstehen. Dies ermöglicht fundierte Entscheidungen und minimiert Unsicherheiten beim Umgang mit komplexen Systemen.

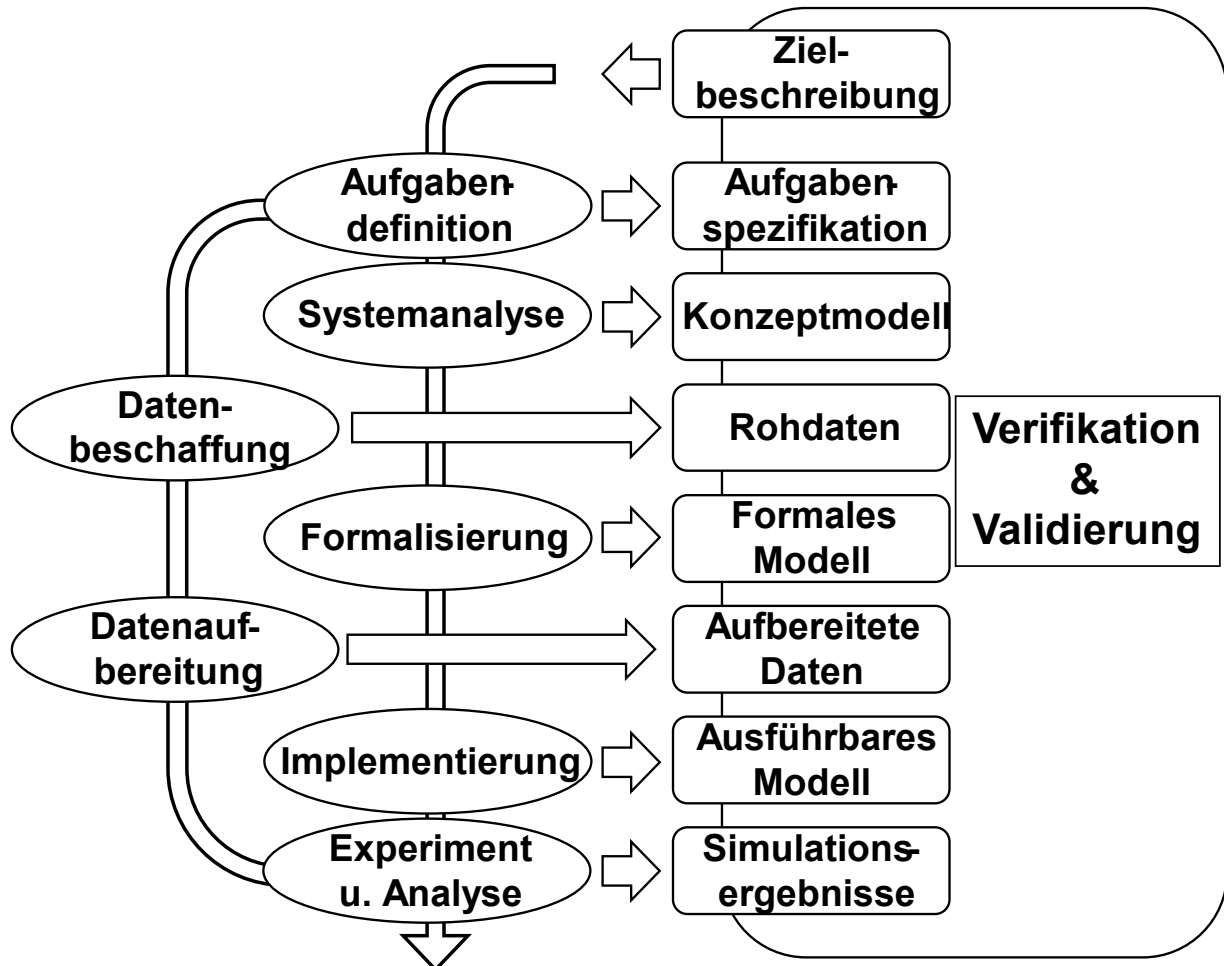


Abbildung 4: Simulationsvorgehensmodell nach (Rabe et al. 2008)

Dadurch eignet sich die Simulation insbesondere als Methode zur Validierung von Wirkzusammenhängen. Dies wurde beispielsweise in Scheidler (2017) sowie Scheidler und Rabe (2021) im Kontext der Wissensentdeckung in Datenbanken aufgezeigt. Hunker et al. (2021) etablieren die Simulation in der Logistik als Datengenerator (Data Farming), um auf der Basis synthetischer Daten unbekannte Wirkzusammenhänge zu entdecken und zu validieren. Darüber hinaus zeigen aktuelle Arbeiten in der Wissenschaft den Einsatz der Simulation zur Entwicklung und Bewertung von Nachhaltigkeitsstrategien, z. B. bei Gruler et al. (2017), Rabe und Goldsman (2019) und Rabe et al. (2020). Die Kombination der Simulation mit Optimierungsmethoden wurde von Juan et al. (2015) aufgezeigt und wissenschaftlich etabliert (Simheuristics). In diesem Kontext wurde die Simulation erfolgreich zur Bewertung von Aktionen in einem logistischen Assistenzsystem verwendet, wie beispielsweise Ammouriova (2021) anführen. Der Nutzen und Einsatz der Simulation vor dem Hintergrund der Digitalen Zwillinge wurde in van der Valk et al. (2020) aufgezeigt und abgegrenzt. Darüber hinaus lassen sich zahlreiche Veröffentlichungen zur Nutzung von Simulation als Brückenbauer für CE finden (z. B. La Torre et al. 2021 und Walzberg et al. 2023). Auf Basis dieser Erkenntnisse wurde Simulation als Methode in DIONA integriert. Sie liefert die Grundlage, um theoretische Ansätze zu validieren, zu bewerten, zu vergleichen und Entscheidungen in unterschiedlichen Settings zu unterstützen. Die Simulation ist damit ein entscheidendes Element bei der Entwicklung und Etablierung der cyber-physischen Labore.

3 Gestaltungsfelder Kreislaufwirtschaft

3.1 Schließung von Kreisläufen

Das Arbeitspaket (AP) 1.1 gliederte sich in zwei große Unterarbeitspakete auf, die in dem Zeitraum von Oktober 2022 bis September 2023 (AP 1.1.1) sowie von Oktober 2023 bis Dezember 2025 (AP 1.1.2) bearbeitet wurden. Das Ziel des ersten APs war es, mittels verschiedener Forschungsmethoden (Interviewstudien, Literaturrecherchen) das Verständnis des Nachhaltigkeitsbegriffes und der damit verbundenen Tätigkeiten, eine Basis zu schaffen und stetig zu verbessern. Innerhalb dieses APs wurde der Begriff aus unterschiedlichen Perspektiven betrachtet, damit vollumfängliche Informationen zusammengefügt werden.

3.1.1 Datengetriebene Nachhaltigkeit

Im Rahmen des APs 1.1.1 „Datengetriebene Nachhaltigkeit“ wurde eine Literaturanalyse durchgeführt, in der relevante Daten für Nachhaltigkeit identifiziert wurden. Der Hintergrund dieser Studie war, dass viele Unternehmen entweder bereits dazu aufgefordert sind, Nachhaltigkeitsberichte zu erstellen oder sie in den nächsten Jahren dazu verpflichtet sind. Eine beispielhafte Vorschrift ist die von der Europäischen Kommission eingeführte Richtlinie zur unternehmerischen Sozialverantwortung, die sogenannte Corporate Social Responsibility Directive (CSRD) (Ulrich und Metzger 2022). Eine weitere ist die Agenda 2030 mit den 17 Zielen für nachhaltige Entwicklung (Sustainable Development Goals, SDGs), die 2015 von den Vereinten Nationen verabschiedet wurden und zum Schutz des Planeten und zur Förderung einer nachhaltigen Zukunft aufrufen (United Nations 2015b). Die steigende Anzahl an gesetzlichen Regelungen verdeutlicht die zunehmende Relevanz von Nachhaltigkeit und der Nachhaltigkeitsberichterstattung. Für die Erstellung solcher Berichte bedarf es einer enormen Datenmenge. Zu diesen Daten zählen beispielsweise Umwelt-, Wirtschafts- oder Sozialdaten. Unternehmen können diese Daten jedoch nicht nur zur Erstellung von Nachhaltigkeitsberichten verwenden, sondern zusätzlich zur Optimierung ihrer Prozesse oder zur Entwicklung neuer Geschäftsmodelle (Möller et al. 2022b). Am Beispiel von Logistikunternehmen zeigt sich, dass typische Anwendungsfälle die Produktüberwachung, die Routenoptimierung und die Sendungsverfolgung entlang der Handelsroute sind (Gómez-Marin et al. 2020; Matsuda und Tanaka 2022; Tang et al. 2022; Yachen Tang et al. 2020). Daten werden somit zu einer wertvollen Ressource. Obwohl bereits einige Forschungsberichte zeigen, wie Daten zur Erreichung einer nachhaltigen Zukunft genutzt werden können, existierte zu Projektbeginn keine dem Konsortium bekannte Studie, die explizit relevante Datenobjekte und -attribute für Nachhaltigkeit identifiziert. Datenobjekte in diesem Kontext sind Sammlungen mehrerer Datenpunkte oder Speicherbereiche mit mehreren Werten, etwa Emissionsdaten oder Mitarbeiterdaten. Datenattribute hingegen sind einzelne Werte, die einen Datenpunkt beschreiben oder einen einzelnen Wert speichern, wie z. B. die Art der Emissionen. Aufgrund des Automobilkontextes wurde der Fokus der Studie hierbei auf die Logistik und die Lieferketten gesetzt. Um die bereits vorhandene Forschung zur Rolle von Daten für Nachhaltigkeit offenzulegen, wurde eine strukturierte Literaturanalyse basierend auf den Methoden von Webster und Watson (2002a) sowie Bandara et al. (2015) durchgeführt. Diese Art der Literaturübersicht gewährleistet die Systematik, die Reproduzierbarkeit, die Transparenz, die Nachvollziehbarkeit sowie die Glaubwürdigkeit (Cram et al. 2020; Paré et al. 2016). Das im Sinne des Verwertungsplans im Jahr 2024 auf der Hawaiian International Conference on System Sciences veröffentlichte Konferenzpaper „Data for Sustainable Development in Logistics and Supply Chains – A Systematic Literature Review“ vertieft den Ansatz und liefert weitere Details zum Forschungsvorgehen und den Ergebnissen. Im Folgenden werden die wichtigsten Resultate und Erkenntnisse der Untersuchung prägnant zusammengefasst.

Tabelle 1: Nachhaltigkeitsdaten – Datenobjekte, Beispielattribute und Zuordnung zu TBL-Dimensionen nach Guennoun et al. (2024)

Data Object (exemplary reference ID)	Exemplary Data Attributes (exemplary reference ID)	Related TBL Dimension(s)	Mapping to SDG(s)
--------------------------------------	--	--------------------------	-------------------

		Economic	Social	Environmental	
Emissions (#1, #2, #3, #6, #9, #18, #19, #22, #24, #26, #28)	Type: CO ₂ , NO _x , etc., Emission control technology (#22); Factor, Unit of measurement (#1)			X	SDG13
Energy consumption/efficiency/conservation (#1, #5, #10, #17, #32, #33, #35)	Rate (#35)	X		X	SDG 7
Global warming Weighting factors (#1)	Unit: per day, per route (#1)			X	SDG 7,13
Fuel consumption (#1, #22, #27, #32)	Type (#22); Cost (#28, #37); Unit: per vehicle (#1)	X		X	SDG 7
Waste (#10, #11, #17, #18)	Type: solid, liquid etc. (#10); Volume (#33); Components: wood, glass, etc. (#33)			X	SDG 14,15
Shipment (#7, #11, #22, #36)	Tracking number, Creation time, Shipping status, Last update time (#7); Estimated arrival time (#7, #36); Volume, Frequency, Time-window (#22); Cost (#11); Distance traveled (e.g., in Km) (#26)	X		X	SDG 13,14
Delivery (#3, #36)	Delivery areas, shortest paths between loading areas, travel time, delivery vehicle, route, delivery location list, initial position of vehicle, delivery start time, estimated duration of delivery, waiting time, arrival time, departure time (#31)	X		X	SDG 13,14
Road network/Route planning (#26, #37)	Geographical location, daily operating time, consolidated origin-destination distance (#26); Road works, Optimal paths (#37)	X		X	SDG 11,13
Vehicle/Fleet configuration (#22, #27, #31, #37)	Vehicle fill rates (#1); End life of vehicle (#10); Number of vehicles (#22); Speed (#22, #27); Position (#27); Transport (#22, #37); Load/Capacity (#27, #37); Type of vehicle or mode of fleet sharing (#37)	X		X	SDG 7,11,13, 14
Traffic & Weather conditions (#26, #37)	Congestion, Freight loading/unloading, Movement of vehicles in the city, and their interaction with traffic (#26); Traffic conditions (#37); Weather conditions and related delays (#37)	X		X	SDG 11
Material (#5, #8, #11, #19, #33)	Type:e.g., hazardous, harmful, toxic, raw, restricted, banned, recycled etc. (#5, #8, #1, #19)			X	SDG 6,13,14, 15
Finished Product (#34, #38)	Mass, cost (#34); Creation date (#38)	X		X	SDG 12
Equipment (#7)	Type, technical parameters of each type of power equipment (#7)	X		X	SDG 9
Building (#7, #11)	ID (#7); Capacity (#11); Type: factory (#7, #11), warehouse (#7, #30), etc.	X		X	SDG 9
Cost (#4, #5, #9, #11, #18, #21, #26, #28, #32, #33, #34, #35)	Type: Fixed costs (#11); Operational costs (#28) (e.g. product cost (#9), labor cost (#9, #11), transport cost (#18, #26, #32, #34), hardware, software, & consultancy costs (#21), fuel cost (#28, #37)), material processing and re-processing cost (#33, #35), Inventory cost (#35) ...etc.); Procurement costs (e.g., purchase price, related taxes) (#32)	X			SDG 8
Profit (#3, #5, #14, #32)	-	X			SDG 8
Transactional Data (#1, #8)	Sales volume (#8); Shipping documents (#7)	X			SDG 8
Business partner Data (customer & supplier) (#26, #32)	Customer data (e.g., number and location, demand in terms of quantities, type of products required, time windows, average loading and unloading times required to serve them) (#26); Supplier data (e.g., number and location, product offerings, loading service times, load capacity of vehicle fleet) (#26); Supplier selection criteria (#32)	X	X	X	SDG 8,10
Contract (#32)	Type: e.g., stakeholder contract, labor relations record, etc. (#32)		X		SDG 5,8,10
Payroll (#5, #12, #28)	Wages or salaries (#5, #12, #28); Male vs. female salaries (#5); Benefit standards (#12)		X		SDG 5,8,10
Employee (#5, #9, #10, #12, #16, #32, #35)	Male vs. female time employment, employment benefits, gender discrimination, inequality (#5); Labour rights and integration (#5, #9); Diversity and equal opportunities, Workers' and employees' condition (#12); Child labour (#10, #12, #16); Cost of employee health & safety (#35)		X		SDG 5,8,10
Training (#5, #25)	Improvement in employee training and education, personal skills (#5); Type: (e.g. compliance with safety & security regulations (#25))		X		SDG 3,4

Tabelle 1: Nachhaltigkeitsdaten – Datenobjekte, Beispielattribute und Zuordnung zu TBL-Dimensionen nach Guennoun et al. (2024) zeigt, dass Daten Einfluss auf die wirtschaftliche, soziale und ökologische Entwicklung haben. Sie hebt die Beziehungen zwischen verschiedenen Datenobjekten, deren Attributen und deren Zuordnung zu den SDGs hervor. Die aufgeführten Datenobjekte können verwendet werden, um Leistungskennzahlen für die Nachhaltigkeitsberichterstattung abzuleiten. Darüber hinaus ist jedes Datenobjekt mit spezifischen Datenattributen verknüpft, die detaillierte Informationen liefern. Beispielsweise lassen sich viele Details über das Datenobjekt „Sendung“ anhand seiner zugehörigen Datenattribute wie „Sendungsnummer“, „Versandstatus“ und „Erstellungsdatum“

ermitteln. Es ist auch wichtig zu beachten, dass die Ergebnisse viele Arten von Daten umfassen, z. B. statistische Daten oder dynamische Daten. Auffällig ist, dass sich die meisten Arbeiten mit ökologischer Nachhaltigkeit, insbesondere Emissionen, beschäftigen. Zudem behandeln die meisten Arbeiten einen konkreten Anwendungsfall. Dadurch ergibt sich auch, dass wirtschaftliche und soziale Nachhaltigkeit in weniger Artikeln behandelt oder nur oberflächlich angesprochen wird.

Aufbauend auf diesen Erkenntnissen wurde eine Interviewstudie mit Vertretern der Automobilindustrie durchgeführt. Ein untergeordnetes Ziel war diesbezüglich, wie Daten in der automobilen CE eingesetzt werden können. Das Ergebnis war, dass Daten zur transparenten Gestaltung des Materialflusses, zur Optimierung des Recyclingprozesses und zur Rückverfolgbarkeit von Produkten in allen Phasen des Produktlebenszyklus eingesetzt werden können. Tracking-Systeme ermöglichen beispielsweise die Verfolgung von Komponenten und Materialien und können eine Datenquelle für digitale Produktpässe sein. Diese enthalten meist Informationen zur Produktherkunft, zur Zusammensetzung oder zur Recyclingfähigkeit. Solche Daten helfen unter anderem in Folge dessen dabei, die Demontageprozesse effizienter zu gestalten. Einige Interviewpartner weisen auch darauf hin, dass Daten nicht nur bei der Demontage eingesetzt werden können, sondern bereits zu Beginn des Lebenszyklus, beim Design des Produktes. Sie können dazu dienen, das kreislauforientierte Design zu fördern, indem die modulare Bauweise optimiert werden kann. Zu diesem Thema wurde zudem im Jahr 2024 das Whitepaper „Einsatz von Daten in der automobilen CE“ auf dem MobilKreis-Digital-Hub veröffentlicht, das tiefergehende Informationen liefert. Ein Auszug der Ergebnisse zum Informationsfluss und möglichen Problemen entlang der Lieferkette veranschaulicht Abbildung 5.

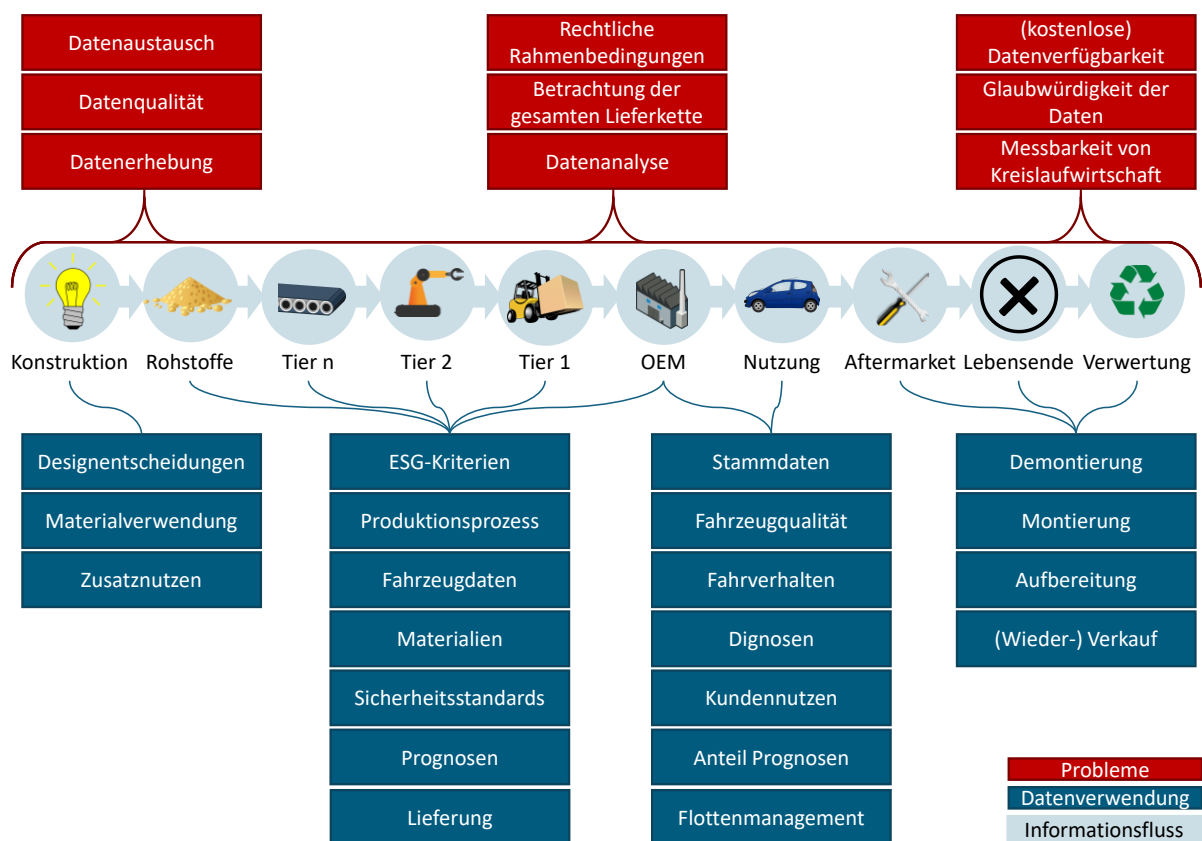


Abbildung 5: Informationsfluss, Datenverwendung und Probleme der Lieferkette

Nachhaltigkeitsberichterstattung und Benchmarks für die Automobilindustrie¹

Die Einführung der CSRD im Rahmen des Europäischen Grünen Deals stellt insbesondere KMU vor erhebliche Herausforderungen. Neben der praktischen Umsetzung von Nachhaltigkeitszielen wird eine transparente und standardisierte Berichterstattung verlangt (Helmold et al. 2024; Umweltbundesamt o. J.). Während große Unternehmen seit 2024 zur Offenlegung verpflichtet sind,

¹ Diese Studie wurde vor der Neufassung der CSR-Richtlinie zum Februar und April 2025 (Rechtskräftig) durchgeführt.

folgt die Einbeziehung von KMU ab 2026. Die regulatorischen Anforderungen dienen der Förderung von Transparenz und sollen Finanzmarktakteuren die Bewertung nachhaltiger Unternehmensstrategien erleichtern (Umweltbundesamt o. J.).

Zur Erfüllung dieser Berichtspflichten stehen unterschiedliche Rahmenwerke zur Verfügung, darunter die European Sustainability Reporting Standards (ESRS), die Eco-Management and Audit Scheme (EMAS), die Global Reporting Initiative (GRI), der Verein Deutscher Ingenieure (VDI) 4070 und der Deutscher Nachhaltigkeitskodex (DNK). Während diese Leitlinien für Großunternehmen geeignet sind, besteht ein deutlicher Anpassungsbedarf an die spezifischen Rahmenbedingungen von KMU (Schütte und Dickel 2023). Zudem fehlen bislang branchenspezifische Vorgaben, was insbesondere für die Automobilindustrie problematisch ist (Kamińska-Witkowska und Kaźmierczak 2024).

Im Rahmen des APs 1.1 war ein Unterziel, Benchmarks für Nachhaltigkeitskennzahlen in der Automobilindustrie zu entwickeln. Ausgehend von 207 Indikatoren aus den vier oben genannten Rahmenwerken wurden nach zwei Iterationen 42 relevante Indikatoren identifiziert, die sich an der CSRD orientieren. Die Datengrundlage bildeten Nachhaltigkeitsberichte von 55 Unternehmen aus der Automobilindustrie (davon 49 Großunternehmen und 6 KMU). Zunächst wurde mit einer Umfrage versucht, aussagekräftige Daten zu den Indikatoren zu erhalten. Jedoch wurde die Umfrage nicht ausreichend beantwortet, sodass die Nachhaltigkeitsberichte als Datengrundlage dienen mussten. In 18 Fällen konnten aussagekräftige Benchmarks entwickelt werden, die als Vergleichsmaßstab insbesondere für KMU dienen können.

Die Ergebnisse zeigen deutliche Unterschiede zwischen OEMs und Zulieferern in einzelnen Bereichen wie Qualifikationsmaßnahmen, während andere Indikatoren (z. B. Ausbildungsquote, Frauenanteil in Führungspositionen) keine signifikanten Abweichungen aufweisen. Auffällig ist die geringe Datenverfügbarkeit bei ökologischen Indikatoren, insbesondere zur CE. Zudem fehlt eine Standardisierung der Einheiten und Erhebungsmethoden, was die Vergleichbarkeit erheblich erschwert (Kamińska-Witkowska und Kaźmierczak 2024).

Insgesamt verdeutlicht die Studie, dass es an transparenter, einheitlicher und branchenspezifischer Datenerhebung mangelt. Für eine wirksame Umsetzung der CSRD in der Automobilindustrie sind daher folgende Punkte zentral:

- Entwicklung branchenspezifischer Leitlinien und Indikatoren, insbesondere für KMU
- Standardisierung der Berichterstattung
- Erhöhung der Datenverfügbarkeit und -qualität
- Verknüpfung mit europäischen Zielvorgaben zur Überprüfung des Zielerreichungsgrades

Die vorliegenden Benchmarks stellen einen ersten Orientierungsrahmen dar. Sie sollen Unternehmen als Grundlage dienen, um eigene Strategien zur Schließung identifizierter Lücken zu entwickeln. Weitere Forschung ist notwendig, um die Indikatoren gemeinsam mit Experten zu validieren und die Wertebasis zu erweitern.

Hinweis: Die vollständige Datengrundlage, detaillierte Methodik sowie die Benchmarktabellen sind im Whitepaper auf dem Hub vorzufinden.

Qualitative Interviewstudie zum Nachhaltigkeitsverständnis

Ziel des APs 1.1.1. im Rahmen des DIONA-Projekts war es, das gesellschaftliche Verständnis des Nachhaltigkeitsbegriffs zu identifizieren. Dies ist damit zu begründen, dass der Nachhaltigkeitsbegriff zwar von vielen Stakeholdern genutzt wird, aber oftmals unterschiedliche Aspekte der Nachhaltigkeit unterschiedlich stark priorisiert werden. Aufbauend hierauf wurde zudem eine Interviewstudie durchgeführt, welche insbesondere die Relevanz der sozialen Nachhaltigkeit in der deutschen Automobilindustrie untersucht. Der Zeitraum des APs war ursprünglich von Oktober 2022 bis September 2024 terminiert. Durch die Erweiterung des Forschungsvorhabens im Rahmen der kostenneutralen Mittelverlängerung um eine zweite Interviewstudie zur sozialen Nachhaltigkeit wurde das AP jedoch insgesamt länger bearbeitet.

Zunächst wurde der wissenschaftliche Forschungsstand durch das Forschungsgebiet hinsichtlich des Nachhaltigkeitsverständnisses und der Potentiale einer nachhaltigen Transformation herausgearbeitet sowie teilnehmende Beobachtungen bei nachhaltigkeits- und CE-Veranstaltungen durchgeführt und protokolliert, um so eine theoretische Grundlage für die empirische folgende Studie

zu produzieren und einen Kurzbericht „Nachhaltige CE in der Automobilindustrie“ verarbeiten. Besuchte Veranstaltungen umfassten unter anderem:

- Unternehmensnetzwerk-Nachhaltigkeit von der IHK (Dortmund, August 2023)
- Ressourcenschonung, Klimaschutz und nachhaltige Geschäftsmodelle vom Netzwerk Ressourceneffizienz (Online, September 2023)
- Circular Valley (Wuppertal, November 2023)

Weiterhin wurden auch durch das Forschungsgebiet TSoz Werksbesichtigungen mit Unternehmen organisiert, um nachhaltige Produktion und CE praxisnah zu erleben und zu einem Austausch von Wissen und Wissenschaft zu fördern. Die folgenden Unternehmen wurden durch Teile des Projektteams besucht:

- Besuch des Thyssen-Krupp-Werks in Duisburg, um die Herstellung von grünem Recyclingstahl und dem aktuellen Stand der Stahlproduktion in Deutschland zu erfahren, sowie den Transformationsprozess zu einer grünen Stahlindustrie (April 2024)
- Besuch von ZF in Bielefeld, in welchem Getriebe menschenzentriert wieder aufbereitet bzw. refurbished werden als Gegenentwurf zu einer rein maschinellen automatischen Sortierung und Wiederaufarbeitung (November 2025).
- Besuch von dem renommierten Pumpenhersteller Wilo in Dortmund, um smarte Lösungen für die Wartung von Pumpen sowie Circular Design Ansätze kennenzulernen (Januar 2023).

Die spannenden Exkursionen und gesammelten Erkenntnisse wurden für auf dem DIONA-LinkedIn Account geteilt, identifizierten Kernergebnisse aus Beobachtung und Literaturrecherche lassen sich wie folgt kompakt zusammenfassen:

Kreislaufwirtschaft und Nachhaltigkeit

Die Welt steht vor der dringenden Herausforderung, den Klimawandel zu begrenzen, um langfristige Schäden für Mensch und Umwelt zu vermeiden. Internationale Vereinbarungen wie das Pariser Abkommen und die deutsche Nachhaltigkeitsstrategie betonen die Notwendigkeit eines umfassenden Wandels. Begriffe wie „Nachhaltigkeit“ und „Transformation“ prägen diesen Diskurs, sind jedoch oft unklar definiert und variieren je nach Branche und Stakeholder:innen (vgl. Abbildung 6). Besonders in der Automobilindustrie, einem zentralen Wirtschaftszweig Deutschlands, zeigt sich eine starke Fokussierung auf ökologische Aspekte wie die Emissionsreduzierung bei Endprodukten (z.B. Elektromobilität), während Produktionsprozesse oder Lieferketten weniger Beachtung finden.

Ein Unternehmensbesuch bei dem Pumpenhersteller Wilo verdeutlichte jedoch, dass Nachhaltigkeit zunehmend auch als kultureller Wandel innerhalb der Unternehmen verstanden wird. So wurde Nachhaltigkeit dort zum obersten Unternehmensziel erklärt, wodurch andere Ziele untergeordnet werden und ein Umdenken angestoßen wird. Das Unternehmen verfolgt eine ganzheitliche Strategie basierend auf den SDGs und kombiniert dabei ökologische Maßnahmen wie hocheffiziente Pumpen mit sozialen Aspekten wie überdurchschnittlicher Entlohnung und ergonomischen Arbeitsplätzen. Zudem werden neue Chancen durch Kooperationen mit Start-ups genutzt, etwa zur Entwicklung einer kleinen prototypischen Wasserstoffgewinnungsanlage.

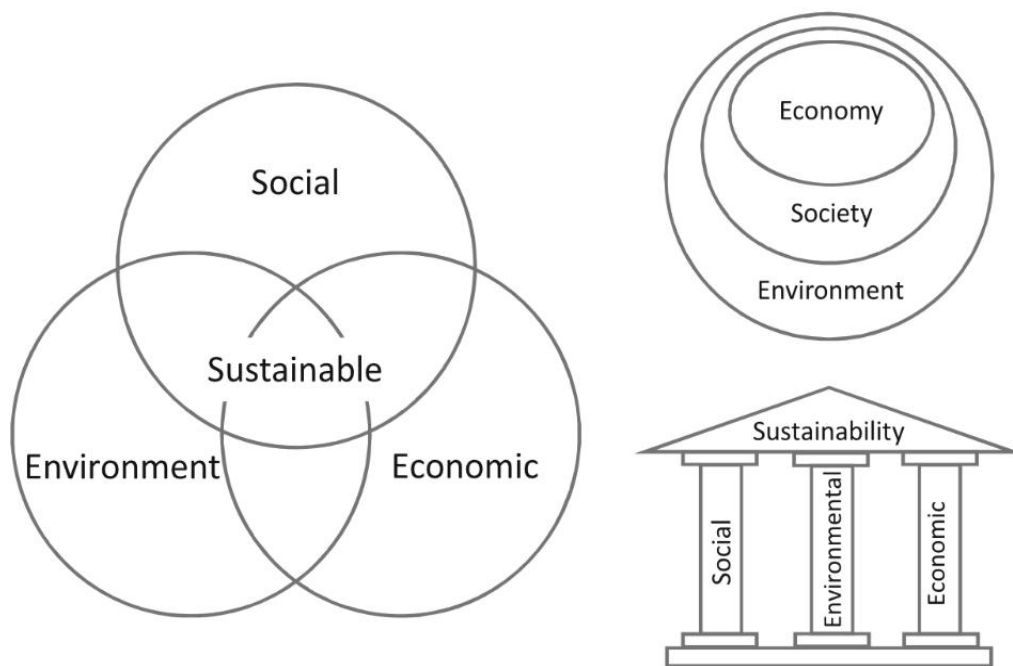


Abbildung 6: Drei Dimensionen der Nachhaltigkeit nach (Purvis et al. 2019)

Ein weiterer Werksbesuch bei Thyssenkrupp Steel zeigte hingegen die Aspekte einer grünen Transformation der Stahlindustrie auf. Umgesetzte Maßnahmen umfassten Grünflächen am Standort sowie ein Schrottanteil von bis zu 25 % bei der Stahlerzeugung. Die Transformation hin zu Direktreduktionsöfen – zunächst betrieben mit Erdgas, später mit Wasserstoff – soll grünen Stahl ermöglichen, obwohl diese Technologie die Nutzung von Altstahl einschränkt. Dennoch werden Kreislaufwirtschaftsansätze wie die Wiederverwendung von Wasser sowie das Recycling von Nebenprodukten aktiv umgesetzt. Umschulungsprogramme für Mitarbeitende sowie hohe Anwerbeprämien zeigen zudem Ansätze sozialer Nachhaltigkeit im Kontext eines signifikanten technologischen Wandels. Somit werden bereits erste Ansätze der CE in der deutschen Industrie umgesetzt. Das Konzept bietet das Potenzial, eine umfängliche nachhaltige Transformation zu ermöglichen. Erste unterstützende Strategien sind bereits auf nationaler Ebene (z.B. KrWG-Novelle 2020) als auch auf internationaler Ebene (European Green Deal) bereits verankert. Dennoch priorisiert die Automobilindustrie häufig ökonomische Ziele über soziale oder ökologische Dimensionen. Ansätze wie die „Circular Society“ legen hingegen Wert auf soziale Innovationen sowie Suffizienzstrategien. Der zweite Besuch offenbarte jedoch auch zentrale Herausforderungen: Gesetzliche Unsicherheiten bezüglich Rezyklatquoten könnten der Unternehmensvertreter zufolge problematisch sein, da nicht genügend Altstahl verfügbar ist, um solche Vorgaben zu erfüllen. Der technologische Lock-In durch Investitionen in Wasserstofföfen erschwert langfristig das Schrottrecycling – trotz hoher Nachfrage nach grünem Premiumstahl seitens der Automobilindustrie bleibt die Zukunft solcher Produkte ungewiss. Gleichzeitig erfordert die Umstellung hohe initiale Investitionen in neue Anlagen und birgt Risiken hinsichtlich möglicher Anlaufschwierigkeiten bei neuer Technologie.

Weitere Sektoren

Auch abseits der Automobilindustrie befinden sich andere Branchen in unterschiedlichen Stadien des Transformationsprozesses, wie die folgende Literaturrecherche verdeutlicht: Die Textilindustrie wird maßgeblich durch das Kaufverhalten der Konsument:innen gesteuert (Desore und Narula 2018, S. 1444–1449). Insbesondere für jüngere Konsument:innen spielt Nachhaltigkeit zunehmend eine größere Rolle und so verwundert es nicht, dass Unternehmen der Textilindustrie sich als nachhaltig agierendes Unternehmen darstellen, um hierdurch die Unternehmensreputation zu verbessern oder ggf. neue „grüne“ Marktsegmente erschließen zu können. Abseits der Konsument:innen sind weitere Treiber einer nachhaltigen Entwicklung der Unternehmen der Textilindustrie der politische Druck (z.B. Umweltregularien) oder auch der Druck der Lieferant:innen z.B. nach einer besseren Bezahlung.

Desore und Narula (2018, S. 1449) differenzieren zwei maßgebliche nachhaltige Unternehmensstrategien in der T&K Industrie: Einerseits eine prozessorientierte Nachhaltigkeit, durch

welche die Firmen beispielsweise durch die Reduktion von Abfall, Energieverbrauch oder auch Materialverbrauchs Kostenvorteile erwirtschaften können. Andererseits eine marktorientierte Nachhaltigkeitsstrategie, in welcher durch die Differenzierung der Produktpalette oder auch der Veränderung bestehender Produkte neue Marktsegmente erschlossen werden sollen.

Diese Strategien führen zwar theoretisch zu positiven sozialen und ökologischen Entwicklungen, jedoch liegen vor allem ökonomische Überlegungen für die Implementation dieser zugrunde. Somit steht bei Unternehmen der T&K Industrie die Effizienzoptimierung von Geschäftsprozessen und die öffentlichkeitswirksame Darstellung von sozialer und ökologischer Nachhaltigkeit, bzw. Nachhaltigkeitsmaßnahmen im Vordergrund, während der tatsächliche ökonomische Grund sowie der Wirkungsgrad der beworbenen Nachhaltigkeitsmaßnahmen nicht kommuniziert wird.

Auch in der Logistikbranche existieren Konzepte, welche Nachhaltigkeitsaspekte integrieren. Zu nennen sind hier insbesondere „Green Logistics“ und „Reverse Logistics“: Diese Konzepte thematisieren maßgeblich die in den 1990ern neu aufkommenden Prozesse der Bewegung von Abfällen oder Gebrauchtmaterialien (vgl. (Rodrigue et al. 2008, S. 2). Im Zuge der Reverse Logistic ergaben sich zudem neue Marktsegmente der Logistik, beispielsweise der von recyclingfähigen Abfällen von Haushalten, aber auch die Entsorgung von nicht-recyclingfähigen, oftmals auch giftigen Materialien, die über weite Strecken in Deponien entsorgt werden müssen. Weiterhin fand im Zuge der Reverse Logistic das Konzept der Reverse Distribution Berücksichtigung. Bei diesem Konzept trägt der Hersteller eines Produkts die Verantwortung für die Auslieferung, aber auch für Rücknahme/Entsorgung der Produkte.

Somit lassen sich hier bereits früh erste Kerngedanken einer industriellen CE verorten. Jedoch existieren unter dem Begriff der grünen Logistik zahlreiche unterschiedliche Definitionen und Begriffsverständnisse, weswegen ein eindeutiges Konzept schwer identifizierbar ist. Was die Ansätze jedoch eint, ist die vornehmliche Berücksichtigung der ökologischen Nachhaltigkeitsdimension, beispielsweise durch die Vermeidung von Abfällen oder auch durch die Messung negativer ökologischer Externalitäten des eigenen Unternehmens oder Partner:innen in der Wertschöpfungskette (Kumar 2015, S. 8). Trotzdem ist das Konzept der grünen Logistik Kumar (2015) zufolge auf den dreiteiligen Nachhaltigkeitsbegriff anwendbar, da durch die zusätzliche Berücksichtigung von Aspekten der ökonomischen und sozialen Nachhaltigkeit – beispielsweise in Form einer effizienteren Routenplanung oder auch der Schaffung von Arbeitsplätzen – umfassende nachhaltige Veränderungen geschaffen werden können. Jedoch besteht auch in der Logistik – ähnlich zu der Textilindustrie – ein Konflikt bezüglich der ökonomischen Dimension der Nachhaltigkeit, beispielsweise in Form des Ziels der Kostenminimierung, und der geringeren Berücksichtigung der ökologischen und sozialen Dimension der Nachhaltigkeit. Zwar werden nachhaltige Produkte durch Konsument:innen nachgefragt, jedoch reagieren die Unternehmen der Logistik maßgeblich in Form einer grünen Außendarstellung ohne substantielle interne Maßnahmen (ebd.). Zu einer ähnlich Erkenntnis kommen auch Rodrigue et al. (2008, S. 3): In der Logistikbranche wird maßgeblich der ökonomische Erfolg durch die Unternehmen der Logistikindustrie priorisiert. Negative Kosten in Form von Emissionen werden hingegen externalisiert zu Lasten der Gesellschaft und Umwelt: Konzepte wie door-to-door (DTD) und just-in-time führen dazu, dass Transportmittel wie LKW aufgrund ihrer Flexibilität präferiert werden, die jedoch vergleichsweise hohe Emissionen produzieren und die Straßen abnutzen. Weiterhin führt der Abbau von Lagern zu einem größeren Verkehrsaufkommen, da das Firmeninventar während des Transports gelagert wird. Außerdem führt der Anstieg von E-Commerce zusätzlich zu einem erhöhten Verkehrsaufkommen, da Lieferungen kleinteilig an Wohneinheiten verteilt werden müssen.

Diese Erkenntnisse legen nahe, dass, um eine erfolgreiche Transformation zu ermöglichen, es klare Definitionen von Nachhaltigkeitsbegriffen sowie detaillierte Betrachtungen kultureller Barrieren innerhalb relevanter Sektoren braucht – insbesondere in der Automobil- und Stahlindustrie als zentrale deutsche Wirtschaftssektoren. Qualitative Sozialforschung kann hier helfen, Best-Practices zu identifizieren und individuelle Probleme innerhalb von Unternehmen zu analysieren – entscheidende Schritte hin zu einer nachhaltigen CE.

Interviewstudie 1 - Nachhaltigkeitsverständnis

Diese Erkenntnisse bildeten die Grundlage für die Interviewstudie zu Nachhaltigkeitsverständnissen in der deutschen Automobilindustrie. Hierfür wurde zunächst ein semistrukturierten Interview-Leitfaden entwickelt, der das Ziel hatte, die Nachhaltigkeit mit offenen Fragen zu ergründen. Dieser

Leitfaden diente als Grundlage für die Durchführung einer Interviewstudie der Interviewstudie und umfasst unter anderem die folgenden Fragen:

- Was bedeutet Nachhaltigkeit für Sie persönlich?
- Inwiefern deckt sich Ihr Nachhaltigkeitsverständnis mit dem Ihres Unternehmens?
- Inwiefern passen CE und Nachhaltigkeit des Unternehmens zusammen?

Um die Akquise der Interviewpartner zu unterstützen, wurde zudem ein Pitch-Deck erstellt. Dieses enthielt eine kurze Vorstellung des Projekts, Beispielfragen aus dem Interview, die Vorteile für die Teilnehmenden sowie eine Einschätzung des zeitlichen Aufwands. Das Pitch-Deck half dabei, potenzielle Interviewpartner von der Teilnahme zu überzeugen und den Mehrwert der Studie klar zu kommunizieren. Auf Basis des erstellten Leitfadens wurden insgesamt zehn Interviews im Zeitraum vom März bis Juli 2023 durchgeführt. Befragt wurden insbesondere Nachhaltigkeits- und CE-Expert:innen von OEMs, KMUs und Unternehmensberatungen. Anschließend wurden die per NoScribe transkribierten Interviews mit der strukturierten Inhaltsanalyse nach Kuckartz (2012) ausgewertet. Die Ergebnisse dieser Interviews lieferten wertvolle Einblicke in das Verständnis von Nachhaltigkeit innerhalb der Automobilindustrie und wurden in einem nächsten Schritt zusammen mit dem IIM in einem Whitepaper mit dem Titel „Nachhaltigkeitsverständnis und Daten – Erfassung, Bedeutung und Perspektiven in der deutschen Automobilindustrie“ veröffentlicht. Dieses Dokument fasst die Erkenntnisse aus den Interviews zusammen und gibt einen umfassenden Überblick über aktuelle Trends und Perspektiven in diesem Bereich. Das Whitepaper ist auf dem MobilKreis-Hub veröffentlicht, um sie einem breiten Fachpublikum zugänglich zu machen. Des Weiteren wurden die Ergebnisse zum Nachhaltigkeitsverständnis in der deutschen Automobilindustrie auf dem 13th international Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing (EcoDesign 2023) im November 2023 in Japan unter dem Titel „Exploring differing perspectives on sustainability and corresponding strategies in German automotive companies“ in einem Vortrag präsentiert und anschließend unter dem gleichen Titel in der Special Issue on Design and Manufacturing for Environmental Sustainability im International Journal of Automation Technology veröffentlicht. Hierdurch konnte insbesondere die Produktionswissenschaft um sozialwissenschaftlich angereicherte Perspektiven bereichert werden.

Ergebnisse

Die Ergebnisse der Interviewstudie lassen sich wie folgt zusammenfassen: Es existieren deutliche Diskrepanzen zwischen individuellen und unternehmerischen Perspektiven auf Nachhaltigkeit (vgl. Abbildung 7). Während Individuen überwiegend ökologische Aspekte priorisieren, dominieren bei Unternehmen ökonomische Überlegungen wie Profitabilität und Effizienz. Diese Unterschiede können zu Spannungen führen, da Mitarbeiter häufig ein stärkeres ökologisches Bewusstsein zeigen als ihre Arbeitgeber.

Zudem zeigt die Analyse, dass das Verständnis von Nachhaltigkeit stark von der jeweiligen Perspektive abhängt. Aus individueller Sicht stehen ökologische Aspekte wie CO₂-Reduktion und Ressourcenschonung im Vordergrund. Soziale und wirtschaftliche Dimensionen spielen eine eher untergeordnete Rolle. Unternehmen hingegen legen den Fokus hauptsächlich auf ökonomische Ziele wie langfristige Rentabilität und effiziente Ressourcenverwendung. Ökologische Maßnahmen wie Energieeinsparungen oder Dekarbonisierung der Wertschöpfungskette sind zwar ebenfalls relevant, soziale Aspekte werden jedoch oft vernachlässigt.

Weiterhin kann die Studie mehrere Hindernisse, aber auch potenzielle Synergien für eine nachhaltige Transformation der Automobilindustrie aufzeigen: Ein zentrales Problem ist die Fixierung vieler Unternehmen auf kurzfristige wirtschaftliche Ziele, was langfristige Nachhaltigkeitsmaßnahmen behindert. Zudem erschweren Machtungleichheiten innerhalb der Lieferketten – insbesondere zwischen OEMs und kleineren Zulieferern – die Umsetzung nachhaltiger Praktiken. Kulturelle Herausforderungen wie das Kaufverhalten von Kunden stellen weitere Hürden dar: Viele Verbraucher sind den Interviewten zufolge nicht bereit, höhere Preise für nachhaltig produzierte Produkte zu zahlen. Trotz dieser Herausforderungen bietet das Konzept der CE vielversprechende Ansätze zur Kombination ökologischer und wirtschaftlicher Ziele der Nachhaltigkeit. Die Wiederaufbereitung von Produkten oder deren Wiederverwendung könnte nicht nur Kosten senken, sondern auch den CO₂-Fußabdruck reduzieren. Solche Ansätze könnten zudem das Bewusstsein für nachhaltiges Handeln stärken – sowohl bei Mitarbeitern, Arbeitgebern als auch bei Kunden. Aus den Erkenntnissen der Studie ließen sich zudem Handlungsempfehlungen ableiten: Um eine nachhaltige Transformation

voranzutreiben, sollten größere Akteure wie OEMs ihre umfangreichen Ressourcen nutzen, um kollektive Maßnahmen innerhalb der Branche zu fördern. Dies könnte durch stärkere Unterstützung kleinerer Zulieferer geschehen, etwa durch Investitionen in nachhaltige Technologien oder faire Preisgestaltung entlang der Lieferkette. Außerdem sei es empfehlenswert, das Verständnis von Nachhaltigkeit innerhalb von Unternehmen zu erweitern und stärker an individuelle Werte anzupassen, um transformative Prozesse zu beschleunigen. Zudem scheint eine gemeinsame Vision sowie Zusammenarbeit innerhalb der Automobilindustrie notwendig zu sein, um eine umfassende nachhaltige Transformation zu ermöglichen – eine Transformation, die nicht nur ökologische Ziele verfolgt, sondern auch soziale Verantwortung integriert.

Aggregiert (n = 10)

	Sozial	Ökologisch	Ökonomisch
Individual	24.47%	50.48%	25.05%
Unternehmen	11.13%	37.37%	51.5%
Differenz	13.34%	13.11%	26.45%

Tabelle 1: Aggregierte Unterschiede zwischen der individuellen und unternehmerischen Nachhaltigkeitswahrnehmung

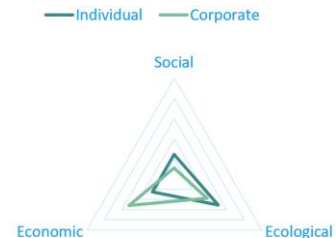


Abbildung 7: Aggregiertes Nachhaltigkeitsverständnis für Individuen und Unternehmen

Soziale Nachhaltigkeit in der deutschen Automobilindustrie

Nachdem sich gezeigt hat, dass soziale Nachhaltigkeit in den Nachhaltigkeitsverständnissen der Unternehmen der deutschen Automobilindustrie einen eher nachrangig behandelten Aspekt darstellt, sowohl im Vergleich zu ökologischen als auch zu ökonomischen Dimensionen, bestand ein klarer Vertiefungsbedarf, sich mit diesem Themenfeld systematisch auseinanderzusetzen. Es war daher sinnvoll zu untersuchen, welche Maßnahmen sozialer Nachhaltigkeit von Unternehmen tatsächlich berichtet und umgesetzt werden, welcher strategischen Tiefe diese Maßnahmen behaftet sind und welche konkreten Herausforderungen und Befähiger sich im Zuge der industriellen Transformation daraus ergeben.

Die folgenden berichteten Studien tragen zu dieser Vertiefung bei, indem sie die unternehmerische Berichterstattung und die Wahrnehmung sozialer Nachhaltigkeit aus Beschäftigtenperspektive analysieren und durch das Kombinieren dieser beiden Perspektiven ein umfassenderes Bild der sozialen Dimension der Nachhaltigkeit in der deutschen Automobilindustrie zeichnen.

Dokumentenbasierte Studie – Berichterstattung zur sozialen Nachhaltigkeit in der deutschen Automobilindustrie

Diese literaturbasierte Studie untersuchte den aktuellen Stand sozialer Nachhaltigkeit in der deutschen Automobilindustrie auf Grundlage der Nachhaltigkeitsberichte von 14 etablierten Unternehmen (OEMs, Zulieferer und weitere Akteure der Wertschöpfungskette). Das Ziel war es, das Spektrum und den Reifegrad sozialer Nachhaltigkeitsaktivitäten in der dt. Automobilindustrie systematisch zu erfassen. Hierzu wurde eine qualitative Inhaltsanalyse nach Kuckartz (2012) mit der Software MaxQDA Statistics Pro 2022 durchgeführt. Als Analysegrundlage dienten die European Reporting Standards zu sozialer Nachhaltigkeit, die ab dem Berichtsjahr 2024 implementiert wurden (ESRS S1–S4). Diese decken soziale Nachhaltigkeit in Bezug auf die folgenden Stakeholdergruppen ab: eigene Belegschaft, Beschäftigte in der Wertschöpfungskette, betroffene Gemeinschaften sowie Kunden und Konsumenten.

Die codierten Textsegmente wurden nach Art der Information (implementierte Maßnahmen, geplante Maßnahmen oder normative Ziele, neutrale Informationen und Kennzahlen) und bei den implementierten Maßnahmen nach strategischer Tiefe (gering, mittel, hoch) kategorisiert und deskriptiv ausgewertet.

Insgesamt wurden 1.626 Textsegmente mit Bezug zu sozialer Nachhaltigkeit identifiziert, davon 929 Textsegmente zu bereits implementierten Maßnahmen. Den Schwerpunkt bilden Aktivitäten für die Stakeholdergruppe der eigenen Belegschaft (64 %), gefolgt von Beschäftigten in der Lieferkette (18 %), Gemeinschaften (12 %) und Kunden (6 %). Die Mehrheit der identifizierten Maßnahmen weist zudem eine mittlere Tiefe (55 %) auf, während transformative Aktivitäten (hohe Tiefe) nur 12 % ausmachen.

Häufigste Themen der Aktivitäten, die die eigene Belegschaft adressieren, sind Gesundheit und Sicherheit sowie Aus- und Weiterbildung, vor allem im Kontext von Digitalisierung und Transformation. In der Lieferkette dominieren Nachhaltigkeitsaudits und Lieferantenkodizes, bei den betroffenen Gemeinschaften soziale Projekte und Bildungs Kooperationen, und bei den Kunden und Konsumenten die Produktsicherheit. Dabei wurden vor allem bei den Stakeholdergruppen der eigenen Belegschaft und der Belegschaft in der Wertschöpfungskette eher inkrementelle oder mit mittlerer Tiefe Maßnahmen berichtet, während bei den Stakeholdergruppen der betroffenen Gemeinschaften ebenfalls transformative Maßnahmen berichtet werden.

Insgesamt zeigt sich, dass soziale Nachhaltigkeit in der deutschen Automobilindustrie zwar durch ein breites Spektrum an Themenkomplexen berücksichtigt, jedoch der Nachhaltigkeitsberichterstattung folgend überwiegend inkrementell umgesetzt wird. Die berichteten Maßnahmen scheinen der Risikominimierung und Außendarstellung zu dienen, statt einer strategisch verankerten sozialen Transformation.

Interviewstudie 2 – Soziale Nachhaltigkeit und Transformation aus Beschäftigtenperspektive

Das Ziel dieser Interviewstudie stellte die Erfassung der sozialen Nachhaltigkeit und Transformation aus der Beschäftigtenperspektive, operationalisiert durch Arbeitnehmervertreter etablierter deutscher Automobilunternehmen, dar. Dies dient dem Zweck, zum einen die unternehmerische Perspektive der sozialen Nachhaltigkeit, die in den Nachhaltigkeitsberichten präsentiert wird, mit den subjektiven Eindrücken der Stakeholdergruppe der Beschäftigten zu vergleichen. Gleichzeitig dient diese Studie dazu, Transformation aus der Beschäftigtenperspektive im Sinne der mitarbeiterzentrierten Transformation abzubilden, mitsamt Einstellungen gegenüber zentralen Transformationsarealen und der Erfassung von Hürden und Befähigern für Transformationsprozesse.

Befragt wurden zehn Arbeitnehmervertreter in leitenden Positionen aus deutschen OEMs und Zulieferern im Rahmen von semistrukturierten Experteninterviews. Die Interviews wurden leitfadengestützt und semistrukturiert geführt (über Zoom/Teams) und anschließend transkribiert, anonymisiert und softwaregestützt mit MaxQDA inhaltlich strukturierend nach Kuckartz (2012) ausgewertet. Die übergeordneten Codes wurden vor allem deduktiv anhand des Interviewleitfadens gebildet und deckten u. a. die Definition sozialer Nachhaltigkeit, Wahrnehmung der Transformationsareale (u.a. Elektromobilität und Nachhaltigkeit), Druck auf die Beschäftigten in der Transformation, Widerstand sowie transformationsfördernde und hemmende Faktoren ab. Ergänzend wurden deduktiv anhand des Materials thematische Unterkategorien abgeleitet.

Die Ergebnisse der Studie zeigen, dass Arbeitnehmervertretungen soziale Nachhaltigkeit vor allem als Sicherung von Arbeitsplätzen, gute Arbeitsbedingungen und Mitbestimmung verstehen. Unter anderem wurde ökonomische Stabilität als Voraussetzung für soziale Nachhaltigkeit betrachtet, wirtschaftlicher Erfolg ermögliche Beschäftigungssicherung und Zukunftsinvestitionen. Gleichzeitig kritisieren die Interviewten, dass soziale Aspekte im ESG-Kontext deutlich hinter ökologischen Zielen zurückstehen. Zentrale Aktivitäten der sozialen Nachhaltigkeit betreffen Aushandlungsprozesse zwischen Management und Belegschaft, z. B. Sozialtarifverträge, Standortumstrukturierungen, Weiterbildungsprogramme und Beschäftigungssicherung. Besonders relevant sind zudem Kooperationen mit Gewerkschaften, Netzwerken und politischen Akteuren. Konflikte entstehen vor allem durch Stellenabbau, Outsourcing und kurzfristige Managemententscheidungen.

Bezüglich der Transformationsareale (das Areal der Elektromobilität wurde in den Interviews am häufigsten diskutiert) zeigt sich ein ambivalentes Stimmungsbild: Nach den Aussagen der Interviewpartner akzeptieren die Beschäftigten ihren Standorte den Wandel zur Elektromobilität pragmatisch, doch kulturelle Bindungen an die Verbrennertechnologie und Zukunftsängste bleiben stark. Der Transformationsdruck, der auf die Beschäftigten wirkt, resultiert aus mehreren Quellen: direkt durch das Management, internationaler Wettbewerb, politische Regulierungen, Kundenanforderungen und technologischer Fortschritt. Am stärksten wirkt jedoch der innere Druck durch Angst vor Arbeitsplatzverlust und Überforderung. Expliziter Widerstand gegen transformative Vorhaben ist jedoch selten, äußert sich jedoch teilweise in innerer Resignation oder punktuelltem Arbeitskampf.

Insgesamt verdeutlichen die beiden Teilstudien die Diskrepanz zwischen der unternehmerischen Darstellung und der erlebten Realität von sozialer Nachhaltigkeit in der deutschen Automobilindustrie. Während die Dokumentenanalyse eine eher instrumentelle Rolle der sozialen Nachhaltigkeit darlegt,

da diese dort vor allem über Gesundheit, Sicherheit und Weiterbildung adressiert, verdeutlichen die Interviews, dass Beschäftigte und ihre Vertretungen soziale Nachhaltigkeit vor allem als Frage von Beschäftigungssicherung und Mitbestimmung verstehen. Beide Perspektiven machen sichtbar, dass die soziale Dimension im Transformationsprozess gegenüber ökologischen und ökonomischen Zielen untergeordnet und wenig strategisch verankert bleibt. Eine nachhaltige Transformation der Branche erfordert daher, soziale Nachhaltigkeit als gleichwertige Säule zu begreifen und stärker strukturell in Unternehmensstrategien zu integrieren.

Aufbauend auf der in AP 1.1.1 durchgeführten Interviewstudie wurden Handlungsmaßnahmen abgeleitet, um nachhaltiger in der automobilen CE zu agieren. Hierbei wurden die Antworten der Interviewpartner hinsichtlich der unternehmensinternen Vorbereitungen, deren Empfehlungen für andere Unternehmen sowie zu Wünschen und Anregungen für eine zukünftige CE ausgewertet. Aus der Analyse ergaben sich sieben Handlungsempfehlungen, die in Abbildung 9 veranschaulicht und im Folgenden näher erläutert werden.



Abbildung 8: Handlungsempfehlungen zur Teilnahme an der automobilen Kreislaufwirtschaft

Zur erfolgreichen Implementierung der CE sollten Unternehmen demnach zunächst die Akzeptanz innerhalb ihrer Organisation und entlang der gesamten Lieferkette fördern. Dies setzt die Sensibilisierung aller beteiligten Akteure voraus, welche durch gezielte Weiterbildungsmaßnahmen sowie die Integration von Fachpersonal mit spezifischer Expertise im Bereich der CE unterstützt werden kann. Darüber hinaus ist es essenziell, die breite Öffentlichkeit in den Transformationsprozess einzubeziehen und für die Prinzipien der CE zu gewinnen. Hierzu eignen sich insbesondere Informationsveranstaltungen, öffentlichkeitswirksame Kommunikationskampagnen sowie edukative Formate, die zur Bewusstseinsbildung beitragen.

Ein weiterer strategischer Schritt besteht in der Etablierung interorganisationaler Kooperationen, um den Austausch von Wissen, Ressourcen und Best Practices zu fördern. Unternehmen sollten in vernetzten Strukturen denken sowie ein ökologisches und ökonomisches Ökosystem aufbauen, das eine Reorganisation der bestehenden Lieferkette ermöglicht. Die Zusammenarbeit entlang der Wertschöpfungskette ist dabei von zentraler Bedeutung. So kann die Rückführung und Wiederverwertung von Materialien beispielsweise durch die enge Kooperation zwischen Produktionsbetrieben und Recyclingunternehmen effizienter gestaltet werden. Ergänzend dazu bietet sich die gemeinsame Entwicklung von Rücknahme- und Recyclingsystemen für Altbauteile an. Für ein kreislauffähiges Produktdesign empfiehlt es sich, bereits in der Phase der Produktentwicklung den Austausch mit den zuvor angesprochenen Recyclingunternehmen zu suchen. Deren praktische Erfahrungen und technische Anforderungen sollten frühzeitig berücksichtigt werden, um die spätere Wiederverwertbarkeit der Produkte sicherzustellen und ressourcenschonende Produktlebenszyklen zu ermöglichen.

Um eine nachhaltige und zukunftsorientierte CE im Automobilsektor zu etablieren, ist es erforderlich, ein Know-how aufzubauen. Ein zentraler Aspekt ist hierbei die Auseinandersetzung mit innovativen Geschäftsmodellen, die den Übergang von der linearen zur zirkulären Wertschöpfung unterstützen.

Dazu zählen unter anderem Car-Sharing-Konzepte, Leasing-Modelle sowie Rücklaufprogramme für Altfahrzeuge. Diese ermöglichen nicht nur eine effizientere Nutzung von Fahrzeugen, sondern schaffen auch die Grundlage für deren systematische Wiederaufbereitung und das Recycling von Komponenten. Parallel dazu müssen Unternehmen relevante gesetzliche Rahmenbedingungen und regulatorische Vorgaben analysieren und in ihre strategische Planung integrieren. Die Kenntnis aktueller und zukünftiger Regularien ist essenziell, um rechtliche Konformität sicherzustellen und gleichzeitig Potenziale für die Gestaltung kreislauforientierter Prozesse zu identifizieren. Darüber hinaus ist die Kooperation mit wissenschaftlichen Einrichtungen von großer Bedeutung. Der Austausch mit Expertinnen und Experten aus Forschung und Entwicklung ermöglicht den Zugang zu innovativen Technologien und fördert die gemeinsame Erarbeitung neuer Lösungsansätze für die CE. Solche Partnerschaften tragen dazu bei, praxisnahe und skalierbare Konzepte zu entwickeln. Nicht zuletzt sollten Unternehmen ihre bestehende Lieferkette sowie die damit verbundenen Materialflüsse systematisch analysieren. Eine fundierte Bewertung der aktuellen Prozesse bietet die Grundlage für die Ableitung neuer Ideen und Optimierungspotenziale.

Eine weitere bedeutungsvolle Handlungsmaßnahme ist die Umstrukturierung unternehmensinterner Prozesse. Ein zentraler Ansatzpunkt ist die Implementierung ressourcenschonender Fertigungstechnologien, die den Material- und Energieverbrauch signifikant reduzieren. Durch den Einsatz moderner Produktionsverfahren können nicht nur ökologische Belastungen minimiert, sondern auch langfristige Kostenvorteile realisiert werden. Ergänzend dazu ist die Integration erneuerbarer Energiequellen in die Produktionsprozesse ein entscheidender Schritt zur Dekarbonisierung industrieller Wertschöpfung. Darüber hinaus sollten Unternehmen geschlossene Materialkreisläufe etablieren, um Abfälle zu vermeiden und Sekundärrohstoffe effizient zu nutzen. Die Rückführung von Materialien in den Produktionsprozess trägt wesentlich zur Ressourcenschonung und zur Reduktion externer Entsorgungsbedarfe bei. Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die Förderung interner Transparenz. Durch die systematische Erfassung und Kommunikation von Prozessdaten lassen sich Optimierungspotenziale identifizieren und die Grundlage für eine kontinuierliche Verbesserung schaffen. Transparente Strukturen erleichtern zudem die Einbindung von Mitarbeitenden in Transformationsprozesse und stärken das organisationsinterne Nachhaltigkeitsbewusstsein. Auch die Einführung neuer, demontagefreundlicher Prozessschritte, wie zum Beispiel das Verschrauben statt Schweißen oder die Verwendung löslicher Klebstoffe, kann die Wiederverwertbarkeit von Produkten erheblich verbessern. Diese Maßnahmen ermöglichen eine vereinfachte Zerlegung und erleichtern die Rückführung einzelner Komponenten in den Materialkreislauf. Schließlich sollten Unternehmen das Konzept „Product as a Service“ weiter ausbauen. Durch die Bereitstellung von Produkten als Dienstleistung, etwa in Form von Nutzungs- oder Mietmodellen, kann die Lebensdauer von Produkten verlängert, deren Nutzung optimiert und die Rückführung in unternehmenseigene Kreisläufe erleichtert werden. Dieses Modell fördert nicht nur die Kundenbindung, sondern unterstützt auch die Umsetzung kreislauforientierter Geschäftsstrategien.

Die Gestaltung kreislauforientierter Produkte stellt eine zentrale Handlungsmaßnahme dar. Unternehmen sind gefordert, ihre Entwicklungsprozesse so auszurichten, dass Produkte über ihren gesamten Lebenszyklus hinweg ressourcenschonend, reparaturfreundlich und recyclingfähig sind. Ein wesentlicher Gestaltungsansatz liegt in der Entwicklung modularer Fahrzeugkomponenten. Durch die Modularisierung lassen sich einzelne Bauteile bei Bedarf gezielt reparieren oder austauschen, ohne das gesamte Produkt demontieren zu müssen. Dies trägt zur Verlängerung der Nutzungsdauer bei und erleichtert die Wiederverwertung von Komponenten. Darüber hinaus sollten Unternehmen verstärkt auf die Verwendung nachhaltiger und recycelbarer Materialien setzen. Der Einsatz von Werkstoffen, die sich nach dem Gebrauch effizient in den Materialkreislauf zurückführen lassen, reduziert den Bedarf an Primärressourcen und minimiert die Umweltbelastung. Gleichzeitig ist es notwendig, die Anzahl schwer recycelbarer Verbundstoffe zu reduzieren. Diese Materialien erschweren die Trennung und Wiederverwertung und stehen somit im Widerspruch zu den Prinzipien der CE. Ein weiterer Aspekt ist die Reduktion der Produktkomplexität. Durch eine vereinfachte Konstruktion können Herstellungsprozesse effizienter gestaltet, Reparaturen erleichtert und Recyclingprozesse optimiert werden.

Eine weitere Handlungsmaßnahme ist die systematische Auseinandersetzung mit geltenden rechtlichen Rahmenbedingungen. Unternehmen sind gefordert, regulatorische Entwicklungen kontinuierlich zu beobachten und ihre Strategien sowie operativen Abläufe entsprechend anzupassen. Ein zentraler Bestandteil dieser Anpassungsprozesse ist die regelmäßige Überprüfung des unternehmensinternen Kenntnisstands zu aktuellen Vorschriften, Normen und Richtlinien. Nur durch

eine fortlaufende Aktualisierung des regulatorischen Wissens kann gewährleistet werden, dass Unternehmen rechtskonform agieren und frühzeitig auf neue Anforderungen reagieren. Darüber hinaus ist der aktive Austausch mit politischen Entscheidungsträgern von strategischer Bedeutung. Die Beteiligung an politischen Diskursen und die Mitgestaltung regulatorischer Prozesse ermöglichen es Unternehmen, ihre Perspektiven einzubringen und gleichzeitig ein tieferes Verständnis für politische Zielsetzungen und zukünftige Entwicklungen zu gewinnen. Dies schafft Planungssicherheit und fördert die proaktive Ausrichtung unternehmerischer Aktivitäten. Schließlich sollten Unternehmen ihre übergeordnete Unternehmensstrategie sowie alle betroffenen Geschäftsprozesse systematisch an die regulatorischen Rahmenbedingungen anpassen. Dies umfasst sowohl strukturelle als auch prozessuale Veränderungen, die sicherstellen, dass Nachhaltigkeitsziele und gesetzliche Anforderungen kohärent in die Unternehmenspraxis integriert werden.

Final spielt die Digitalisierung eine signifikante Rolle bei der Umsetzung von CE in der Automobilindustrie. Unternehmen sind gefordert, digitale Technologien gezielt einzusetzen, um Transparenz zu schaffen, Prozesse zu optimieren und die Wiederverwendung von Produkten und Komponenten systematisch zu fördern. Ein wesentlicher Hebel liegt in der Nutzung digitaler Plattformen, die den Austausch und die Wiederverwendung von Komponenten ermöglichen. Solche Plattformen schaffen die infrastrukturellen Voraussetzungen für eine effiziente Vernetzung von Akteuren entlang der Wertschöpfungskette und erleichtern die Rückführung von Bauteilen in den Produktionsprozess. Darüber hinaus sollten Unternehmen relevante Daten identifizieren, systematisch erfassen und verfügbar machen. Die Bereitstellung entscheidungsrelevanter Informationen, z. B. zu Materialzusammensetzung, Lebensdauer oder Recyclingfähigkeit, ermöglicht fundierte strategische und operative Entscheidungen und unterstützt die Optimierung kreislaforientierter Prozesse. Ein weiterer potenzieller Baustein ist die Etablierung eines digitalen Produktpasses. Dieser dient der transparenten Dokumentation produktspezifischer Informationen und schafft die Grundlage für eine verbesserte Nachverfolgbarkeit über den gesamten Lebenszyklus hinweg. Schließlich sollten Unternehmen ihre Wertschöpfung in digitale Netzwerke integrieren, um den kontinuierlichen Informationsaustausch zwischen Partnern, Kunden und Zulieferern zu gewährleisten.

Im weiteren Arbeitsverlauf innerhalb des APs wurde ein Konzept der nachhaltigen CE in der Automobilindustrie entwickelt. Die bisherigen Erkenntnisse wurden durch eine Standortbestimmung, durch Hemmnisse und sogenannte dynamische Fähigkeiten erweitert, wodurch eine Konzeptualisierung der automobilen CE geschaffen wurde.

Um den aktuellen Stand der Automobilunternehmen zu bestimmen, wurde eine empirische Untersuchung auf Grundlage öffentlich zugänglicher Informationen durchgeführt. Dabei erfolgte eine systematische Analyse der Internetseiten von neun Unternehmen. Hierbei wurden insgesamt 150 Maßnahmen zur CE identifiziert. Diese ließen sich 30 Dimensionen zuordnen und wurden systematisch innerhalb des 9R-Frameworks von Potting et al. (2017b) verordnet.

R0 – R9 high to low level of CE		R0	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	
None measure	1 – 4 measures	Refuse	Rethink	Reduce	Re-use	Repair	Refurbish	Remanufacture	Repurpose	Recycle	Recover	Other
5 – 9 measures	≥ 10 measures											
Sum		5	6	18	12	2	9	11	3	46	0	38
offer of sharing services	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
building a network	8	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	5
preparation of products/components	8	0	0	0	0	0	7	1	0	0	0	0
creation of secondary material (recycled materials)	2	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0
digitization	6	0	2	4	0	0	0	0	0	0	0	0
introduction of new business areas	8	0	0	0	0	0	0	2	0	1	0	5
saving of critical materials	4	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0
development of alternative products	5	0	0	0	0	0	0	4	1	0	0	0
development of new manufacturing processes	3	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	1
development of new recycling processes	8	0	0	0	0	0	0	0	0	7	0	1
development of new repair processes	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
development of new technologies	6	0	0	2	0	0	0	0	0	2	0	2
development of resource-saving products	3	2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
investment in new technologies	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
promoting rethinking	2	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0
circular product design	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	18
material return	8	0	0	0	1	0	0	1	0	6	0	0
employee training	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3
material recycling	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
repair of products	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
collection points	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
training of corporate partners	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
conversion of old parts	2	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0
sale of secondary materials (recycled materials)	6	0	2	0	4	0	0	0	0	0	0	0
use of durable materials	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
use of renewable raw materials	4	2	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0
use of alternatives	2	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
use of secondary materials (recycled materials)	21	0	0	1	1	0	0	1	1	17	0	0
recycling of waste products	11	0	0	1	1	0	1	0	0	8	0	0
reuse of transport material	3	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0

Abbildung 9: Maßnahmen der automobilen Kreislaufwirtschaft.

Besonders hervorzuheben ist die Verwendung von Sekundärmaterialien (recyclten Materialien). 14% aller Maßnahmen und sieben von neun Unternehmen befassen sich mit der Verwendung solcher Materialien zur Herstellung neuer Fahrzeuge. Einige Unternehmen arbeiten mit Unternehmen anderer Branchen zusammen, um deren Abfallprodukte für ihre Fahrzeuge zu verwenden (Ford Motor Company 2023). Ein weiterer relevanter Aspekt, den die Unternehmen zur Etablierung einer CE nutzen, ist die Etablierung eines (branchenübergreifenden) Ökosystems. Mehr als die Hälfte der untersuchten Unternehmen ergreifen Maßnahmen zum Aufbau eines solchen Systems. Eine weitere interessante Erkenntnis ist die Relevanz des zirkulären Produktdesigns (12% aller Maßnahmen). Unternehmen sehen dies als Voraussetzung für kreislaforientiertes Handeln. An dieser Stelle ist hervorzuheben, dass das 9R-Framework kein Prinzip aufweist, dem das Redesign zugeordnet werden kann. Eine branchenspezifische Anpassung ist ein Diskussionspunkt, dem in weiteren Forschungen nachgegangen werden kann. Des Weiteren zeigen die Untersuchungsergebnisse eine Diskrepanz zwischen der Priorisierung der Prinzipien in Industrie und Forschung. Während das Recycling in der Industrie als weniger bedeutungsvoll angesehen wird, fokussieren sich Unternehmen insbesondere auf diese Dimension. Gegensätzlich dazu verhält sich das Prinzip der Abfallvermeidung. Die Forschung betont, dass dieses Prinzip zu einer erheblichen Steigerung der CE führen kann. In der Automobilindustrie wird es jedoch kaum umgesetzt. Weitere Details und Diskussionspunkte dieser Analyse wurden in Form des Konferenzbeitrags „Turning Old into New – The Lane Change to a CE in the Automotive Industry“ auf der Gesellschaft für Informatik im Jahre 2023 veröffentlicht.

Die Hemmnisse ergaben sich durch die Aussagen und Meinungen verschiedener Interviewpartner aus unterschiedlichen Bereichen der Automobilindustrie. Die Aussagen wurden zunächst separat betrachtet und analysiert. In einem weiteren Schritt wurden sie zu den drei Dimensionen „Verlust der Wirtschaftlichkeit“, „Gesetze/Regularien/Standards“ und „Digitalisierung“ zusammengefasst. Die Befragten äußerten die Befürchtung, dass eine (übermäßige) Datenweitergabe die wirtschaftliche Leistung beeinträchtigen könnte. Zudem betonten die Interviewpartner, dass rechtliche Rahmenbedingungen und Standards ein zentrales Hemmnis darstellen. Zum einen wird die

bestehende Unsicherheit in der Gesetzgebung als hemmend für Entscheidungsprozesse wahrgenommen, da sie zu Verzögerungen oder zum Ausbleiben von Entscheidungen führt. Zum anderen erschwert die Heterogenität internationaler rechtlicher, zoll- und steuerrechtlicher Vorgaben die Umsetzung einheitlicher Standards. Darüber hinaus wurde hervorgehoben, dass bestehende Normen und Standards teilweise im Widerspruch zueinander und zu den angestrebten Maßnahmen stehen, wodurch zusätzliche Barrieren für die praktische Umsetzung geschaffen wurden. Durch die Dimension „Digitalisierung“ wird verdeutlicht, dass die Digitalisierung im Kontext der CE sowohl Chancen als auch Hemmnisse mit sich bringt. Zentrale Problembereiche betreffen die Vertrauenswürdigkeit und Zugänglichkeit von Daten sowie die Schwierigkeit, aus vorhandenen Daten fundierte Benchmarks und Indikatoren abzuleiten. Gleichzeitig wird betont, dass die Digitalisierung von Unternehmensressourcen eine grundlegende Voraussetzung für die Funktionsfähigkeit der CE darstellt.

Die sogenannten dynamischen Fähigkeiten stellen die Grundlage für Unternehmen dar, um daraus eine Strategie abzuleiten. Zur Ableitung dieser Fähigkeiten wurden zunächst 37 Nachhaltigkeitsreporte verschiedener Automobilunternehmen analysiert und auf Aussagen hinsichtlich der CE untersucht. Daraus ergab sich ein Sample von 278 Statements. Diese wurden in einem dritten Schritt codiert, sodass sich 53 Fähigkeiten ergaben, die Unternehmen besitzen sollten, um erfolgreich an der CE teilnehmen zu können. Der Konferenzbeitrag von Hoppe et al. (2024) liefert einen detaillierteren Überblick über diese 53 Fähigkeiten, die zu 13 Mikrodimensionen zusammengefasst wurden.

3.1.2 Handlungsempfehlungen für eine nachhaltige Kreislaufwirtschaft

Ziel des APs 1.2 war es, in der Laufzeit von Oktober 2023 bis zum Ende des Projekts im Dezember 2025 ein umfassendes Verständnis der soziotechnischen Implikationen einer Adaption der nachhaltigen CE und datengetriebener Geschäftsmodelle und -prozesse zu entwickeln und in Form von Veröffentlichungen und Konferenzbesuchen mit relevanten Stakeholdern zu teilen.

Soziotechnische Implikationen

Für die Erforschung der soziotechnischen Implikationen wurden zunächst mittels einer strukturierten Literaturanalyse Dossiers zu den Themen mitarbeiterzentrierte Transformation, Konzeptionen einer nachhaltigen CE und soziotechnischer Wandel. Anschließend wurde eine Mixed-Methods-Fallstudie in Form qualitativer Analyse von Nachhaltigkeitsberichten und einer anschließenden Studie zu Chancen und Hürden im Transformationsprozess hin zu einer CE untersucht. Die Ergebnisse wurden in unterschiedlichen Formaten und auf unterschiedlichen Konferenzen sowohl im Inland als auch im Ausland präsentiert und diskutiert. Hierdurch konnte einerseits der wissenschaftliche Fokus auf die Transformation hin zur CE gesetzt werden und zum anderen die Forschungsergebnisse verbessert werden. Zunächst werden im Folgenden stets die inhaltlichen Ergebnisse präsentiert und anschließend berichtet, inwiefern diese veröffentlicht oder auf Konferenzen präsentiert wurden.

Dossiers (mitarbeiterzentrierte Transformation, kreislaufwirtschaftliche Transformation)

Hinsichtlich der einschlägigen Literatur zur mitarbeiterzentrierten Transformation zeigt sich, dass Mitarbeiter entscheidend für den Transformationsprozesse in Unternehmen, sei es im Bereich Nachhaltigkeit oder Digitalisierung, sind. Studien zeigen, dass CSR die Motivation, Zufriedenheit und Entwicklung der Mitarbeiter stärkt und besonders Frauen bessere Karrieremöglichkeiten bietet. Psychologische Sicherheit, faire Behandlung und aktive Mitwirkung fördern Offenheit gegenüber Wandel, während Widerstand durch mangelndes Commitment entstehen kann. Eine nachhaltige Transformation erfordert die Einbindung aller Mitarbeiterebenen. Mitarbeiter übernehmen dabei Rollen als Implementierer, Botschafter oder Empfänger von Nachhaltigkeitspraktiken. Ihr Engagement wird durch interne Kommunikation, Bildung sowie Unterstützung des Top-Managements gestärkt. Anerkennung und Belohnung steigern zusätzlich die Motivation. Auch bei digitalen Transformationen ist aktive Mitarbeiterbindung zentral: Erwartete Arbeits-Outcomes beeinflussen ihre Einstellung gegenüber Veränderungen direkt. Freiwilliges Feedback der Mitarbeiter ist eine Voraussetzung für den Erfolg solcher Initiativen. Zusammenfassend zeigt sich: Kommunikation, Empowerment und Anerkennung sind essenziell, um Mitarbeiter aktiv einzubinden und langfristigen

Erfolg zu sichern. Unternehmen profitieren davon, ihre Mitarbeiter gezielt zu motivieren und in Veränderungsprozesse einzubeziehen.

Der einschlägigen Literatur zu Erfolgsfaktoren für die Transformation zur CE folgend, hängt das Gelingen der Transformation von verschiedenen internen und externen Faktoren ab. Zu den internen Faktoren zählen Produktdesign, „Product Service Systems“, Unternehmenskultur, Implementierungsprozesse, Transparenz und Technologie. Externe Faktoren wie das Ökosystem, Konsumenten und regulatorische Rahmenbedingungen spielen ebenfalls eine zentrale Rolle. Digitale Lösungen, etwa KI in der Mülltrennung, fördern Ressourceneffizienz und Abgasreduktionen in der Abfallwirtschaft. Ein Verständnis für die Märkte rezirkulierter Produkte sowie technologische Fortschritte im Design sind entscheidend für die Zirkularität von Produkten. Mittelgroße Unternehmen mit einem starken Fokus auf Forschung und Entwicklung neigen am ehesten zur CE-Transformation. Regionale Entwicklungen werden durch institutionelle Charakteristika geprägt, etwa durch Industrieparks oder lokale Netzwerke, die industrielle Symbiosen ermöglichen. Kooperation zwischen Stakeholdern ist ein zentraler Treiber für Innovationen in der CE. Studien identifizieren zudem Barrieren wie notwendige Kapazitäten und Unternehmensdynamiken sowie Vorteile von Clusterstrukturen und Technologien im Abfallmanagement. Insgesamt zeigt sich: Die Transformation erfordert eine ganzheitliche Betrachtung technologischer, kultureller und institutioneller Aspekte sowie gezielte Förderung von Kooperationen innerhalb regionaler und industrieller Netzwerke.

Hinsichtlich der Literatur zum Zusammenspiel von CE und Nachhaltigkeit zeigt sich, dass die CE grundsätzlich systemisch auf drei Ebenen betrachtet werden kann: Makroebene (Städte, Regionen, Länder), Mesoebene (Industrieparks) und Mikroebene (Produkte, Unternehmen, Verbraucher:innen). Für jede Ebene lassen sich Indikatoren zur Bewertung der Nachhaltigkeit identifizieren. Studien zeigen jedoch, dass soziale Aspekte in der CE stark unterrepräsentiert sind. Während wirtschaftliche und ökologische Dimensionen durch zahlreiche Indikatoren wie Kosten, Preise oder CO₂-Einsparungen erfasst werden, gibt es nur wenige soziale Indikatoren wie Mitarbeiterzufriedenheit und Arbeitsplatzsicherheit. Zudem befinden sich bestehende Indikatoren noch im Entwicklungsstadium.

Kritische Studien bemängeln die fehlende Berücksichtigung sozialer Aspekte sowie das Fehlen eines einheitlichen Verständnisses der CE. Der Begriff dient als Sammelbegriff für unterschiedliche Konzepte, was Anschlussfähigkeit ermöglicht, aber die Umsetzung erschwert. Vorherrschende Ansätze fokussieren oft auf wirtschaftliches Wachstum statt auf sozial-ökologische Transformationen. Dies macht die CE zu einem schwer umsetzbaren Konzept, insbesondere aufgrund kultureller Barrieren. Um diese Herausforderungen zu überwinden, wird eine stärkere Berücksichtigung sozialer Aspekte und Stakeholder vorgeschlagen, beispielsweise mit Konzepten wie der „Circular Society“.

Insbesondere der Aspekt der sozialen Nachhaltigkeit in der Transformation wurde in der Studie zur sozialen Nachhaltigkeit als Teil des AP 1.1.1 erforscht und berichtet. Das Forschungsgebiet TSoz hat sich im Rahmen des AP 1.2 zunächst dem aktuellen Stand der CE in der deutschen Automobilindustrie anhand einer qualitativen Analyse der Nachhaltigkeitsberichte gewidmet.

Qualitative Analyse von Nachhaltigkeitsberichten der Akteure der deutschen Automobilindustrie:

Die explorative Studie der Nachhaltigkeitsberichte der deutschen Automobilindustrie zeigt, dass etablierte Unternehmen („Incumbents“) vor allem auf die CE-Strategien Recycling und Reduce setzen. Diese beiden Ansätze sind vermutlich am häufigsten in den Nachhaltigkeitsberichten dokumentiert, da sie relativ leicht in linearen Produktionssystemen umgesetzt werden können. Recycling umfasst Maßnahmen wie Wasserrecycling-Programme oder innovative Verfahren zur Wiederaufbereitung von Hochspannungsbatterien. Reduce-Maßnahmen beinhalten beispielsweise die Substitution von Kunststoff durch natürliche Materialien oder die Abschaffung von Verpackungen.

Die strategische Tiefe der in den Nachhaltigkeitsberichten berichteten Maßnahmen variiert stark: Während viele Maßnahmen nur eine geringe bis mittlere Tiefe aufweisen, sind tiefgreifende Innovationen selten. Die Mehrheit der CE-Aktivitäten bleibt inkrementell, wodurch radikale sozio-technische Transformationen bisher ausbleiben. Dies deutet darauf hin, dass Unternehmen sich

primär an kurzfristigen Effizienzgewinnen orientieren, ohne grundlegende Veränderungen ihrer Geschäftsmodelle anzustreben.

Zu den wichtigsten identifizierten Vorteilen der CE gehören die Dekarbonisierung der Produktion, die Förderung nachhaltiger Konsumpraktiken sowie eine erhöhte Transparenz für Endnutzer:innen. Beispiele hierfür sind Kennzeichnungen mit Nachhaltigkeitsinformationen oder Anleitungen für korrektes Recycling. Darüber hinaus wird vereinzelt auch eine Verbesserung bestehender Produkte genannt, etwa durch emissionsarme Designs oder Energieeinsparungen in der Nutzungsphase.

Als zentrale Befähiger für die Umsetzung von CE-Maßnahmen werden neue technische Prozesse wie modulare Produktdesigns und chemische Recyclingverfahren in den Nachhaltigkeitsberichten genannt. Forschungsk Kooperationen zwischen Industrieunternehmen und Universitäten spielen ebenfalls eine Schlüsselrolle bei der Entwicklung innovativer Ansätze. Digitale Technologien wie Digitale Zwillinge ermöglichen zudem Vorhersageanalysen und optimieren Produktionsabläufe. Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die Standardisierung relevanter Indikatoren und Dateninfrastrukturen, etwa zur Berechnung des Recyclinganteils in Produkten.

Trotz dieser Fortschritte zeigen sich mehrere Herausforderungen: Rebound-Effekte könnten erzielte Nachhaltigkeitsgewinne teilweise wieder zunichtemachen, während ein Best-in-Class-Bias dazu führt, dass Unternehmen überwiegend ihre Erfolge betonen und gescheiterte Maßnahmen kaum berichten. Zudem fehlt es an standardisierten Berichtsschemata, was Vergleiche zwischen Unternehmen erschwert.

Die Studie hebt hervor, dass komplexere Strategien wie Refuse und Rethink stärker erforscht werden sollten. Diese übergeordneten Ansätze bieten potenziell größere Nachhaltigkeitsgewinne als inkrementelle Maßnahmen im Bereich Recycling oder Reduce. Allerdings stehen diese Strategien oft im Widerspruch zum grünen Wachstumsnarrativ der Industrie und erfordern einen grundlegenden Wandel in Denkweisen und Geschäftsmodellen.

Abschließend wird deutlich, dass die Transformation zur CE derzeit noch in einer frühen Phase steckt und vor allem durch schrittweise Innovationen geprägt ist. Um eine umfassende sozio-technische Veränderung zu erreichen, sollten zukünftige Forschungen quantitative Analysen zu den Auswirkungen CE-Maßnahmen durchführen sowie Wege identifizieren, um radikalere Strategien effektiv umzusetzen. Standardisierte Berichtsschemata könnten dabei helfen, Barrieren besser zu verstehen und die Vergleichbarkeit zwischen Unternehmen zu erhöhen – ein wesentlicher Schritt hin zu einer erfolgreichen Implementierung der CE in der Automobilindustrie.

Experteninterviews: Chancen und Hürden in der Transformation zur Kreislaufwirtschaft

Diese Interviewstudie knüpft an eine vorangegangene Untersuchung an, in der Recycling und Reduce als dominante Strategien der CE in der deutschen Automobilindustrie identifiziert wurden. Aufbauend darauf vertieft sie die Analyse, indem sie untersucht, welche Chancen, Herausforderungen und Befähiger etablierte Unternehmen in der Umsetzung zirkulärer Ansätze wahrnehmen und wie transformativ diese tatsächlich sind. Ziel war es, ein tieferes Verständnis dafür zu gewinnen, welche Faktoren den Wandel hin zu einer zirkulären Automobilwirtschaft fördern oder hemmen.

Dafür wurden zehn semistrukturierte Experteninterviews mit Nachhaltigkeits- und CE-Expert:innen aus OEMs, Zulieferern, aber auch anderen Dienstleistern wie Logistik- und Recyclingunternehmen durchgeführt. Die Interviewpartner umfassen Experten von Industriepartnern der MobilKreis-Förderrichtlinie, aber auch externen Partnern. Die Auswertung erfolgte mithilfe einer inhaltsstrukturierenden qualitativen Analyse nach Kuckartz.

Die Interviewergebnisse zeigen, dass CE von den meisten Unternehmen primär als ökonomisch-ökologische Strategie verstanden wird, die Effizienzsteigerung und Wettbewerbsfähigkeit vereinen soll. Als wichtigste Chancen wurden daher Kosten- und Materialeinsparungen, Ressourceneffizienz sowie eine gesteigerte Resilienz durch geschlossene Materialkreisläufe und geringere Abhängigkeit von globalen Rohstoffmärkten genannt. Zudem eröffnen sich neue Geschäftsmodelle, insbesondere serviceorientierte Ansätze wie Product-as-a-Service, und ökologische Vorteile wie CO₂-Reduktion und Abfallvermeidung. Insgesamt wird die CE als potenzieller Hebel für eine wettbewerbsfähige und

nachhaltige Industrie gesehen, allerdings überwiegend unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten. Die Chancen hinsichtlich der sozialen Dimension der Nachhaltigkeit (z.B. Beschäftigungssicherung) bleiben weitgehend unberücksichtigt.

Gleichzeitig verdeutlichen die Interviews zahlreiche Herausforderungen, die die Transformation bremsen. Besonders stark wird die fehlende kurzfristige Rentabilität zirkulärer Maßnahmen betont: Nachhaltige Materialien und Prozesse sind teurer, während Investitionen in Kreislaufösungen oft erst langfristig Erträge bringen. Hinzu kommen technische und prozessuale Hürden, etwa in der Demontage, Standardisierung und Rückverfolgbarkeit von Materialien. Auch regulatorische Unsicherheiten, etwa unterschiedliche nationale Regelungen, aufwendige Genehmigungsverfahren und unklare Standards für Sekundärrohstoffe, hemmen Fortschritte. Weitere Barrieren bestehen in der Komplexität der Produktarchitektur, der Risikoaversion etablierter Akteure und einer mangelnden Offenheit für Innovation, die von linearen Denk- und Geschäftsmodellen geprägt sind.

Als zentrale Befähiger werden drei Bereiche hervorgehoben: Erstens politische Maßnahmen, wie gesetzliche Quoten, Produktpässe, Steueranreize oder gezielte Förderprogramme, die den wirtschaftlichen Rahmen für CE schaffen. Zweitens technologische Innovationen, insbesondere digitale Rückverfolgbarkeitssysteme, modulare Produktgestaltung und neue Recyclingverfahren, die operative Umsetzungen erleichtern. Drittens kulturelle und organisationale Faktoren, darunter eine offene Innovationskultur, Weiterbildungsmaßnahmen und Kooperationen entlang der Wertschöpfungskette. Auch wirtschaftliche Argumente wie ein klar erkennbarer Return on Investment sowie Führungskompetenz und intrinsische Motivation von Mitarbeitenden gelten als entscheidend für die erfolgreiche Implementierung.

Insgesamt bestätigen die Befunde der Interviewstudie das Bild der vorangegangenen Analyse der Nachhaltigkeitsberichte: Die Circular-Economy-Aktivitäten der deutschen Automobilindustrie konzentrieren sich bislang überwiegend auf inkrementelle, risikoarme Maßnahmen wie Recycling und Ressourceneffizienz. Eine tiefgreifende Transformation bleibt aus, da kurzfristige Gewinnorientierung, technologische Grenzen und kulturelle Trägheit dominieren. Um das Potenzial der CE auszuschöpfen, plädiert die Studie für stärkere gesetzliche Anreize, die Förderung sozio-technischer Innovationen sowie einen kulturellen Wandel in Unternehmen und Gesellschaft hin zu langfristigem Denken, Kooperation und echter zirkulärer Wertschöpfung.

Archetypenbildung unter Verwendung einer Clusteranalyse

Teil des APs 1.2 war es zudem basierend auf den Fallstudien Archetypen zu identifizieren und zu charakterisieren. Hierfür wurde basierend auf der zuvor beschriebenen Literaturstudie eine Clusteranalyse durchgeführt.

Methodisch wurde hierfür die Two-Step-Clusteranalyse angewandt und die Anzahl der bereits umgesetzten R-Strategien als Cluster-Variablen genutzt. Diese Methode ermöglicht es gemäß Backhaus et al. (2023), ähnliche Objekte zu ähnlichen Gruppen zusammenzufassen, indem sich die gebildeten Gruppen möglichst stark voneinander abgrenzen. Zudem ist das Two-Step-Clusterverfahren leichter zu interpretieren und hinsichtlich der empirischen Güte zu bewerten. Grundsätzlich gilt, dass die Clusteranalyse ein exploratives statistisches Verfahren ist und neue und nicht eindeutig festgelegte Lösungen erzeugt, die anschließend von Wissenschaftler:innen interpretiert werden müssen. Das Ergebnis der Two-Step-Clusteranalyse ist in Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 2: Two-Step-Clusteranalyse der R-Strategien

Durchschnittswerte					
Clusternummer	1	2	3	4	Gesamt
Mitarbeiteranzahl	147544,2	83729,8	80711,8571	282926	111348,833
Umsatz	59477,2	20376,1	46750,2857	189000	41359,8611
OEM	0,2	0	0,2857	1	0,2222
Recover	0,2	0	0,2857	3	0,3333
Recycle	4	2	4,7143	9	4

Repurpose	0,4	0,2	0,1429	2	0,3333
Remanufacture	0,2	0	0	2	0,1667
Refurbish	1,2	0,2	0	0	0,3889
Repair	0,4	0	0,4286	2	0,3889
Reuse	0,2	0	0,4286	4	0,4444
Reduce	1,8	0	2,8571	3	1,7778
Rethink	0,2	0,2	0	1	0,1667
Refuse	0	0	0	0	0

Abweichung vom gesamten Durchschnittswert

Clusternummer	1	2	3	4
Mitarbeiteranzahl	36195,3667	-27619,033	-30636,976	171577,167
Umsatz	18117,3389	-20983,761	5390,4246	147640,139
OEM	-0,0222	-0,2222	0,0635	0,7778
Recover	-0,1333	-0,3333	-0,0476	2,6667
Recycle	0	-2	0,7143	5
Repurpose	0,0667	-0,1333	-0,1904	1,6667
Remanufacture	0,0333	-0,1667	-0,1667	1,8333
Refurbish	0,8111	-0,1889	-0,3889	-0,3889
Repair	0,0111	-0,3889	0,0397	1,6111
Reuse	-0,2444	-0,4444	-0,0158	3,5556
Reduce	0,0222	-1,7778	1,0793	1,2222
Rethink	0,0333	0,0333	-0,1667	0,8333
Refuse	0	0	0	0

Mittels der durchgeführten Clusteranalyse konnten vier Cluster von Unternehmen innerhalb oder nahe der deutschen Automobilindustrie identifiziert werden, die sich hinsichtlich der Umsetzung CE-Strategien (R-Strategien) teils deutlich voneinander unterscheiden. Diese Abweichungen vom Mittelwert geben Aufschluss über unterschiedliche strategische Schwerpunkte, technologische Ausrichtungen und Wertschöpfungstiefen der jeweiligen Unternehmen.

Cluster 1: Etablierte Industrieunternehmen mit moderatem Ressourcenkreislauf (Atlas Co, Brückner, DMG Mori, Interzero, Volkswagen)

Cluster 1 zeigt insgesamt für überwiegend leicht überdurchschnittliche Werte bei Refurbish, Remanufacture, Repurpose und Reduce, während Recover und Reuse leicht unterdurchschnittlich ausgeprägt sind. Dies deutet auf eine stärker produktbezogene als stoffbezogene Kreislaufstrategie hin. Unternehmen wie Volkswagen oder DMG Mori verfügen über komplexe Fertigungsprozesse und etablierte After-Sales-Strukturen, was die Umsetzung insbesondere von Refurbish (Aufarbeitung von Komponenten) begünstigt. Auch Reduce spiegelt sich in effizienteren Produktionsprozessen und Materialeinsparungen wider, die typischerweise in großen OEMs und Zuliefernetzwerken etabliert sind und helfen, Kosten zu reduzieren. Die unterdurchschnittliche Ausprägung von Recover und Reuse lässt sich damit erklären, dass diese Strategien stärker auf stoffliche Rückgewinnung und logistische Wiederverwendung zielen – Tätigkeiten, die in vorgelagerten Wertschöpfungsstufen (z. B. Recyclingunternehmen) konzentriert sind. In diesem Zusammenhang verwundert die Einordnung

von Interzero in die erste Clustergruppe durch die Clusteranalyse, da es sich hier um einen Entsorger handelt. Ein Grund kann darin liegen, dass der Entsorger sein Kerngeschäft nicht ausführlich in seinem Nachhaltigkeitsbericht beschreibt.

Cluster 2: Dienstleistungsorientierte Akteure mit geringer Kreislaufintegration

Cluster 2 besteht aus den Unternehmen Capgemini, Covestro, Deprag, Rhenus sowie Siemens. Er weist durchweg unterdurchschnittliche Werte in nahezu allen R-Strategien auf. Beispielsweise fallen die niedrigen Werte von Recover, Recycle, Repurpose und Repair auf, was auf eine geringe operative Umsetzung CE-Aktivitäten schließen lässt. Die in diesem Cluster vertretenen Unternehmen sind vielfach Dienstleister oder technologieorientierte Zulieferer (z. B. Capgemini, Siemens) mit Fokus auf Beratung, Digitalisierung oder Materialentwicklung. Ihre Wertschöpfung liegt weniger in der physischen Produktaufbereitung als in der Prozessoptimierung und Innovation. Entsprechend ist die direkte Implementierung materieller R-Strategien limitiert. Dieses Ergebnis ist konsistent mit der Annahme, dass Dienstleistungs- und Systemanbieter in der Automobilbranche eher indirekt zur CE beitragen – etwa durch Effizienzsteigerung, datenbasierte Entscheidungsunterstützung oder Softwarelösungen – anstatt durch eigene Rückführungsprozesse. Abermals passt hier ein Akteur (Siemens) nicht in diese Begründung. Hier muss angenommen werden, dass derzeit CE-Aktivitäten kein große Rolle für das Unternehmen spielt.

Cluster 3: Produkt- und komponentenorientierte Industrieakteure mit Fokus auf Recycling und Materialeffizienz

Cluster 3 besteht aus den Unternehmen Arburg, Edelhoff, FFT, Ford, Forvia, Henkel sowie Mercedes-Benz und zeigt ein differenziertes Profil: Während Recycle und Reduce überdurchschnittlich ausgeprägt sind, liegen unter anderem Refurbish und Remanufacture leicht unter dem Mittelwert. Diese Konstellation deutet auf eine starke Ausrichtung auf stoffliche Kreisläufe und Effizienzsteigerung in der Produktion hin. Unternehmen wie Mercedes-Benz, Ford oder Forvia betreiben großskalige Produktionsprozesse mit hohem Materialeinsatz, weshalb Maßnahmen zur Abfallminimierung (Reduce) und Materialrückführung (Recycle) ökonomisch besonders relevant sind. Das vergleichsweise geringe Engagement in Refurbish und Remanufacture kann durch den hohen Produktkomplexitätsgrad erklärt werden: Die Aufarbeitung einzelner Komponenten ist in der Serienproduktion technisch aufwendig und wirtschaftlich häufig nur in ausgewählten Bereichen (z. B. Batterien, Motoren) sinnvoll. Insgesamt spiegelt Cluster 3 den typischen Ansatz großer OEMs wider, die CE primär über Prozess- und Materialoptimierung, weniger über produktbezogene Rückführungsstrategien realisieren.

Cluster 4: Isolierter Vorreiter mit starker Kreislauforientierung

Cluster 4, das alleinig aus Stellantis besteht, hebt sich deutlich von den übrigen Clustern ab und zeigt überdurchschnittlich hohe Werte in fast allen R-Strategien, insbesondere Recycle, Remanufacture, Repair, Reuse und Reduce. Diese Ausprägung deutet auf eine umfassend integrierte Kreislaufwirtschaftsstrategie oder zumindest einen entsprechend hohen Stellenwert im Nachhaltigkeitsreporting hin. Stellantis verfolgt bereits auf Konzernniveau ambitionierte Circular-Economy-Programme, die u. a. auf Wiederaufbereitung, Wiederverwendung und Rückführung von Fahrzeugkomponenten abzielen. Die hohen Abweichungen können als Ausdruck einer systematischen Transformation hin zu geschlossenen Stoffkreisläufen interpretiert werden. Stellantis agiert hier als Branchenvorreiter, was auch durch die organisatorische Bündelung CE-Aktivitäten in eigenen Geschäftseinheiten (z. B. „SUSTAINera“) unterstützt wird.

Zusammengefasst verdeutlicht die Clusteranalyse eine funktionale Differenzierung der Kreislaufwirtschaftsstrategien in der deutschen Automobilindustrie: Cluster 1 und 3 repräsentieren klassische Industrieakteure mit starker operativer Basis, die auf Materialeffizienz und prozessbezogene Optimierung setzen. Cluster 2 steht für wissensbasierte und dienstleistungsorientierte Unternehmen, deren Beitrag zur CE eher indirekter Natur ist. Cluster 4 schließlich zeigt, dass eine umfassende Integration aller R-Strategien zwar möglich ist, aber derzeit nur von wenigen Akteuren systematisch umgesetzt wird. Diese Heterogenität reflektiert den Reifegrad der Circular-Economy-Transformation im Automobilsektor: Während einige Unternehmen bereits strategisch integriert handeln, stehen andere noch am Anfang der praktischen Implementierung. Unterschiede in Geschäftsmodellen,

Produktkomplexität und Wertschöpfungstiefe erklären dabei weitgehend die beobachteten Abweichungen.

Konferenzen und besuchte Veranstaltungen:

- International Sustainability Transitions (IST), 17-19.06.2024 in Oslo, Norwegen des Sustainability Transition Research Networks (STRN) mit dem Thema: Sustainability Transitions and Nature
- Science, Technology and Science Conference (STS), 5-7.05.2025 in Graz, Österreich
- International Sustainability Transitions (IST), 23-26.06.2025 in Lissabon, Portugal des Sustainability Transition Research Networks (STRN) mit dem Thema: Tensions and trade-offs in structural changes for sustainability transitions
- Wissenschaftsforum Mobilität (WiFo Mobilität), 15.05. in Duisburg, Deutschland mit dem Thema: Solving Conflicts on the Way to Sustainability

3.2 Schaffung von Handlungsräumen

3.2.1 Best Practices zur Geschäftsmodellentwicklung

Taxonomie und Archetypen

Das Konzept der CE birgt Potenzial für neue Geschäftsmodelle, denn neben der Umsetzung zirkulärer Strategien wird auch ein monetärer Wert erwirtschaftet. Eine weitere Unterkategorie datengetriebener Geschäftsmodelle liefert präzise Analysen oder Informationen zu bestimmten Themen (Hartmann et al. 2016). Datengetriebene Geschäftsmodelle sind im Rahmen der CE gefragt, da sie Unternehmen und anderen Stakeholdern bei der Umstellung auf eine CE helfen können, bestehende Probleme zu lösen (Luoma et al. 2021). Sie können fehlende Daten bereitstellen und durch den Einsatz von Algorithmen der Künstlichen Intelligenz fundierte Erkenntnisse für Entscheidungen liefern (Henry et al. 2020). Insbesondere Start-Ups entwickeln solche datenbasierten Lösungen, um Implementierungsprobleme von Unternehmen im Bereich der CE zu lösen. In der Automobilindustrie, insbesondere in rohstoffkritischen Bereichen, besteht ein großes Potenzial für innovative Lösungen, da diese entlang der gesamten Wertschöpfungskette gefragt sind (CIRCULAR REPUBLIC und UnternehmerTUM 2025; Ziegler und Abdelkafi 2023).

Im Rahmen des Forschungsprojekts DIONA und im AP 1.2 wurden daher datenbasierte Start-Ups innerhalb der Automobilindustrie systematisch analysiert, strukturiert und charakterisiert. Auf Basis der Ergebnisse wurde eine Taxonomie entwickelt, die das Verständnis für datengetriebene Geschäftsmodelle mit Fokus auf die CE in der Automobilindustrie erleichtert. Taxonomien werden häufig im Bereich der Geschäftsmodellentwicklung eingesetzt (Möller et al. 2022a). Sie bieten den Vorteil, dass sie komplexe und neuartige Phänomene vereinfacht beschreiben, indem eine Transparenz durch eine strukturierte Darstellung ermöglicht wird (Nickerson et al. 2013; Möller et al. 2022a). Darüber hinaus bietet die Anwendung der Taxonomie eine verbesserte Vergleichbarkeit von Geschäftsmodellen (Szopinski et al. 2019).

Die zugrunde liegende Taxonomie wurde auf Basis des methodischen Vorgehens nach Kundisch et al. (2022) entwickelt. Als Datengrundlage dienten 42 empirische Fallbeispiele, die aus dem für die Automobilindustrie gegründeten Ökosystem Catena-X² und der Start-Up Plattform STARTUP Autobahn³ stammen. Die Sammlung und Auswahl relevanter Start-ups erfolgte zwischen November 2023 und Januar 2024.

Die entwickelte Taxonomie, dargestellt als morphologischer Kasten (siehe Abbildung 10), umfasst sechs Meta-Dimensionen, 16 Dimensionen und 68 Charakteristika und beschreibt zentrale Merkmale datenbasierter Geschäftsmodelle zur Förderung der CE. Im Fokus der Analyse standen insbesondere die verschiedenen Serviceangebote, die adressierten Akteure, die genutzten Technologien sowie der Datenbezug. Die Ergebnisse zeigen, dass datenbasierte Start-ups digitale Technologien wie Künstliche Intelligenz und Blockchain einsetzen, um Wertversprechen rund um die CE zu realisieren. Der Fokus dieser Geschäftsmodelle liegt auf Datenanalysen, Berechnungen und der Bereitstellung von Daten,

² <https://catena-x.net/de/>

³ <https://startup-autobahn.com/>

etwa zur Ermittlung und Reduzierung von Treibhausgasemissionen. Diese Daten bilden die Grundlage für strategische und operative Maßnahmen zur Umsetzung zirkulärer Geschäftsmodelle.

Meta-Dimensionen	Dimensionen	Charakteristika						
Wertangebot	Serviceangebot	End-to-End Lösung	Digitaler Marktplatz	Analyse und Überwachung	Management Lösungen	Prozess - digitalisierung	Digitale Objekt - / Prozessabbildung	Datenbank
	Zweck	Transparenz	Optimierung	Zusammenarbeit	Rückverfolgbarkeit	Einhaltung Compliance	Effizienzsteigerung	
	Kundengruppe	OEM	Nutzfahrzeughersteller	Batteriebersteller / -industrie	(Sonstige) Automobilhersteller	Autoverwerter / -recycler	Branchenneutral	
Schnittstelle	Kundenschnittstelle	Webbasierte Plattform			Mobile App			Plugin App
	Datenintegrations - schnittstelle	GUI			API			(IoT) Sensoren
Serviceplattform	Technologie	KI / ML			Cloud			Blockchain
	Datenressource	Prozessdaten	Fahrzeugdaten	Batteriedaten	Sensor - / Maschinendaten	Lieferkettendaten	Materialdaten	Externe Daten
	Datenquelle	Interne Datenquelle				Externe Datenquelle		
	Datenerfassung	Manuell			Dynamisch			Beide
	Datenaktivität	Erfassung	Generierung	Aggregation	Verarbeitung	Analysierung	Visualisierung	Verteilung
Organisations - struktur	Partnerschafts - netzwerk	Ökosystem	Technologieunternehmen	Beratungsunternehmen	Verbände		Hochschulen / Universitäten	Sonstige
	Integration weiterer Akteure	Zulieferer	Behörden		Kunden		Partner	Keine
Erlösmodell	Angebots - möglichkeiten*	Abonnement			Wertverkauf			Freemium
	Preisstruktur*	Feste Preise				Variable Preise		
Kreislaufwirtschaft	Designoptionen	Share		Optimize		Loop		Virtualize
	Fokusobjekt	(Kritische) Rohstoffe		Fahrzeugkomponente		Maschinen & Produktionsanlagen		Wertschöpfungskette

Abbildung 10: Taxonomie zur Beschreibung datengetriebener zirkulärer Geschäftsmodelle

Neben der Taxonomie wurden auch Archetypen datenbasierter, zirkulärer Geschäftsmodelle entwickelt. Diese werden auf Basis gemeinsamer und wiederkehrender Muster und Strukturen gebildet (Möller et al. 2022a). Im Bereich der Geschäftsmodellentwicklung helfen Archetypen, ein besseres Verständnis zu entwickeln, und bieten einen Orientierungsrahmen. Deshalb werden sie häufig in diesem Bereich eingesetzt, indem sie direkt nachgeahmt oder teilweise angepasst werden (Bocken et al. 2014).

Im Rahmen des APs 1.2 wurden die Archetypen folgendermaßen entwickelt. Als Datenbasis dienten die 42 Objekte sowie die hier im AP 1.2 entwickelte Taxonomie (s. Tabelle 3). Die Taxonomie fungierte als theoretischer Rahmen zur Strukturierung der Muster. Um Archetypen zu bilden, kann eine Clusteranalyse durchgeführt werden, wie es in dem Beitrag von van der Valk et al. (2022) beschrieben wurde. Clusteranalysen helfen bei der Identifizierung von Mustern, die dann in Cluster geordnet werden (Jain et al. 1999). Die zuvor erstellte Taxonomie bot darüber hinaus die Möglichkeit, die Muster zu strukturieren. Die Clusteranalyse wurde mithilfe der frei verfügbaren Statistiksoftware R und RStudio durchgeführt. Die identifizierten Charakteristika der Unternehmen wurden in ein binäres Zahlensystem überführt, was für die Durchführung der Analyse essenziell ist. Mithilfe der oben genannten Software wurden statistische Methoden wie die Ellbogenmethode oder der K-Means-Algorithmus durchgeführt, um eine hohe Konvergenz der Cluster zu identifizieren und aussagekräftige Archetypen zu entwickeln. Im Anschluss wurden die einzelnen Cluster auf ihre Besonderheiten und Unterschiede zu den anderen analysiert und interpretiert. Insgesamt konnten fünf Archetypen gebildet werden, die sich in den Dimensionen und Charakteristika der Taxonomie unterscheiden.

1. Datengestützte Prozess- oder Produktoptimierung
2. Ganzheitliche Tools zur Nachhaltigkeitsbewertung
3. Autoverwerter-Software
4. Digitaler Produktpass
5. Datengestützte Batterieanalyse

Die fünf Archetypen unterscheiden sich insbesondere durch ihre kreislauffähigen Ansätze, die adressierten Akteure sowie die technologische Ausgestaltung. Während Archetyp 3 auf die Optimierung von Autoverwerter-Prozessen abzielt, fokussieren die Archetypen 4 und 5 auf die Kreislauffähigkeit von Batterien für Elektrofahrzeuge. Der vierte Archetyp ermöglicht insbesondere Rückverfolgbarkeit und transparente Informationsbereitstellung entlang der Wertschöpfungskette, während der fünfte Archetyp die Batterienutzung optimiert und die Ladezyklen effizient steuert. Dies bildet eine zentrale Grundlage für kreislauffähige Strategien. Der erste Archetyp bezieht sich dagegen

eher auf den allgemeinen Prozess oder die Produktoptimierung und somit nur auf einen Teil der Wertschöpfungskette, beispielsweise auf das Produktdesign, die Produktionsplanung oder die Produktionssteuerung. Im Vordergrund stehen nicht Nachhaltigkeit oder CE, sondern die effizientere Gestaltung und Steuerung von Prozessen und Produkten mithilfe innovativer digitaler Technologien. Das senkt folglich den Energie- und Rohstoffverbrauch. Eine detaillierte Beschreibung und beispielhafte Unternehmen der Archetypen können der Tabelle 3 entnommen werden.

Die Ergebnisse der Analyse zeigen deutlich, dass datenbasierte Geschäftsmodelle ein hohes Potenzial für die Beschleunigung der Transformation hin zu einer zirkulären Automobilwirtschaft bieten. Durch die intelligente Nutzung digitaler Technologien und Daten werden Transparenz, Ressourceneffizienz und Kreislauffähigkeit entlang der Wertschöpfungskette erhöht. Start-ups fungieren hierbei als Treiber dieser Transformation. Ihre Ansätze liefern wertvolle Impulse, die auch etablierten Unternehmen als Orientierung für eigene Geschäftsmodellinnovationen oder als Investitionsmöglichkeiten dienen können.

Tabelle 3: Übersicht der fünf identifizierten Archetypen

Index	Archetypbezeichnung	Beschreibung	Beispielunternehmen
1	Datengestützte Prozess- oder Produktoptimierung	Der hier beschriebene Archetyp nutzt innovative Technologien zur Automatisierung und Verbesserung von Unternehmensabläufen. Dabei liegt der Fokus auf der Steigerung der Effizienz und Förderung der Transparenz. Der Einsatz von KI- und ML-Algorithmen sowie Cloud Computing ermöglicht die Aggregation und Analyse von Daten. Die visuelle Darstellung von Prozessen in Dashboards unterstützt die Optimierung von Produkten und Prozessen und trägt indirekt zur Nachhaltigkeit bei, indem aufgrund der optimierten Produktions- und Prozessauslastung CO ₂ reduziert wird. Ebenso kann eine effizientere Anpassung von Geschäftsprozessen hinsichtlich der Implementierung der CE erfolgen.	Sensmore, Ascon-Systems, e-laborate
2	Ganzheitliches Tool zur Bewertung der Nachhaltigkeit	Dieser Archetyp bietet Unternehmen Lösungen zur Analyse der Wertschöpfungskette und zum CO ₂ -Management. Der Archetyp sammelt und berechnet alle Daten der gesamten Wertschöpfungskette. Verschiedene Nachhaltigkeitsbewertungen von Unternehmen oder Produkten werden angeboten. Eine Besonderheit ist der Einsatz von Big Data und KI zur Datenverarbeitung und -analyse. Indirekt wird die CE gefördert, da grundsätzlich Bewertungen zu CO ₂ -Fußabdrucken angeboten werden, die CO ₂ -Hotspots durch Transparenz aufzeigen. Diese können als Hilfestellung für die Weiterentwicklung in Richtung CE dienen.	carbmee, Daato Technologies, sustamize
3	Datengestützte Verwertungssoftware	Dieser Archetyp digitalisiert Prozesse für Autoverwerter, indem Software zur Erfassung und Dokumentation bei der Fahrzeugannahme bereitgestellt werden. Die erstellte Datenbank in Bezug auf Autoverwertungsprozesse unterstützt den Annahmeprozess, indem Fahrzeuginformationen angereichert und direkte Angebote für Autoteile von Wiederverwertern angegeben werden. Der Beitrag zur CE ist groß,	Smoods, KUMASoft, K.a.p.u.t.t.

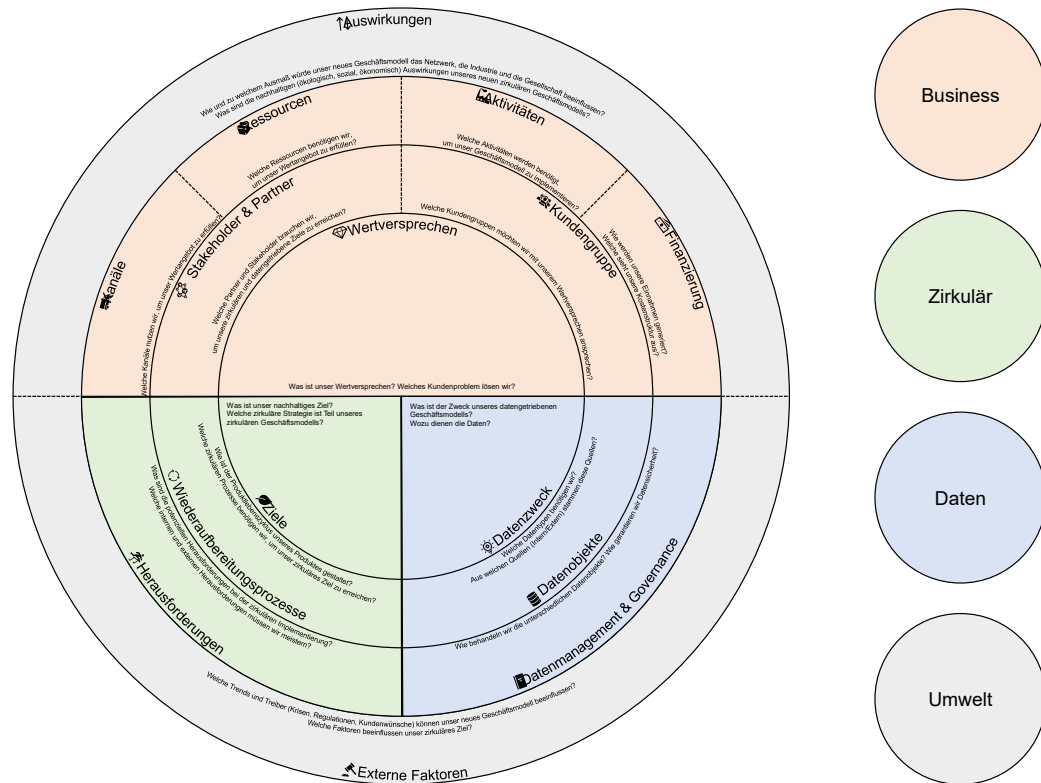
Index	Archetypbezeichnung	Beschreibung	Beispielunternehmen
		denn die Demontage und Wiederverkauf stellen eine relevante Schnittstelle in der CE dar.	
4	Digitaler Produktpass	Dieser Archetyp fördert die CE durch die Einführung des digitalen Produktpasses, der die Transparenz und die Rückverfolgbarkeit in der Lieferkette ermöglicht. Dabei werden Blockchain-Technologie und Cloud Computing genutzt, um die Rückverfolgbarkeit zu gewährleisten, während Datenanalyseleistungen zur Berechnung des CO ₂ -Fußabdrucks und der Ökobilanz bereitgestellt werden.	Optel Group, Circulor, SISeven
5	Datengestützte Batterie Analyse	Dieser Archetyp zielt darauf ab, die Elektrobatterie durch Datenanalyse und Simulation zu optimieren. Dadurch werden präskriptive Analysen für effizientere Flottenverwaltung ermöglicht. Gleichzeitig fördert er die CE durch die Verlängerung der Batterielebensdauer und die Reduzierung von Abfall und Emissionen. Ebenso wird das Produktdesign für zukünftige Elektrobatterien optimiert.	ACCURE, circunomics, TWAICE

Visual Inquiry Tool – Smart Circular Canvas

Eine weitere Möglichkeit, Geschäftsmodellinnovationen und -entwicklung zu fördern, ist die Anwendung von verschiedenen Geschäftsmodellwerkzeugen (Athanasopoulou und Reuver 2020). Im Rahmen dessen wurde ein Visual Inquiry Tool (VIT) für Unternehmen und Personen entwickelt, die sich auf solche spezifischen Geschäftsmodelltypen spezialisieren möchten. VITs sind beliebte und häufig im Management eingesetzte Werkzeuge, insbesondere für die Geschäftsmodellgestaltung, -analyse und -entwicklung, denn es bietet aufgrund der vereinfachten Darstellung Komplexität aufzubrechen und Personen mit einem unterschiedlichen Wissensgrad die Komplexität vereinfacht zu beschreiben (Avdiji et al. 2020). Eines der bekanntesten VIT ist das Business Model Canvas (BMC) von Osterwalder und Pigneur. Das BMC unterteilt ein Geschäftsmodell in neun Elemente, wie z. B.: Wertversprechen, Kundensegment, Schlüsselressourcen oder Kosten und Einnahmen (Osterwalder und Pigneur 2010). Diese Elemente beschreiben, aus welchen Bausteinen ein Geschäftsmodell grundsätzlich besteht. Beispielhafte Fragen und Anregungen dienen zum verbesserten Ausfüllen eines Canvas.

Aufbauend auf dem Design Science Research Ansatz nach Peffers et al. (2007) und einer strukturierten Literaturrecherche nach vom Brocke et al. (2009) wurde das VIT „Smart Circular Canvas“ gebildet. Ziel dieses Canvas' ist die (Weiter-)Entwicklung und Innovationsförderung von datengetriebenen, zirkulären Geschäftsmodellen. Das Canvas basiert auf der Analyse der identifizierten, relevantesten Elemente datenbasierter und zirkulärer Geschäftsmodelle. Nach zwei Evaluierungsschleifen wurde das Canvas fertiggestellt. Insgesamt umfasst das Werkzeug 15 Elemente, unterteilt in vier Bereiche: Business (7 Elemente), Zirkulär (3 Elemente), Daten (3 Elemente), Umwelt (2 Elemente), was in Abbildung 11 dargestellt ist.

Smart Circular Canvas



© Hannah Scheerer, TU Dortmund, DIONA

Abbildung 11: Smart Circular Canvas⁴

Um den Canvas beispielhaft anzuwenden, wurde aus dem Kontext der Mobilkreisförderung ein Geschäftsmodell des Projektes „Autopilot“ im Canvas abgebildet. Zudem wurde das Canvas erstmals auf der Digitalen Woche präsentiert und in die von DIONA angebotenen Workshops integriert.

Das aus der Mobilkreisinitiative gegründete Verbundprojekt Autopilot setzt sich aus sechs Partnern zusammen: Forschungseinrichtung (WZL der RWTH Aachen), Mobilitäts-OEM (e.Volution), Zulieferer (Stackpole), Software-Dienstleister für eine digitale Plattform (SEEBURGER, Innoface), Energieberatung (Altran) und Equipment as a Service Dienstleister (EDAG PS, ligenium). Das Ziel des Projektes war es, ein neues Geschäftsmodell „Equipment-as-a-Service“ für kreislauffähige Betriebsmittel zu entwickeln. Hierbei handelt es sich um ein ganzheitliches Konzept, das sich von der standardisierten Entwicklung über die Integration in eine wandlungsfähige bis hin zur Wieder- bzw. Weiterverwendung spezialisiert hat. Mithilfe von digitalen Technologien (digitale Plattform) und dem entsprechenden Geschäftsmodell wird es umgesetzt.

Als Informationsgrundlage dienten uns Präsentationen der ersten MobilKreistagung, Veröffentlichungen zu dem Projekt sowie die Internetseite. Während des Ausfüllens des Canvas zu dem oben genannten Verbundprojekt und dem Geschäftsmodell sind folgende Punkte aufgefallen:

Das Wertversprechen des Verbundprojektes bzw. Geschäftsmodells ist die Reduzierung von Ressourcen und Energie durch die modulare Aufbereitung. Im Vordergrund steht insbesondere die flexible und nachhaltige Produktion mit modularen Betriebsmitteln. Um den nachhaltigen Aspekt zu erfüllen, wird beim Geschäftsmodell folgende R-Strategien integriert: Reuse, Refurbish, Remanufacture, Recycle. Mithilfe der digitalen Plattform und Datenauswertung wird entschieden, welche R-Strategie zu der Qualität der Betriebsmittel passt. Der dritte Teil des Wertversprechens ist der Datenzweck. Mittels der Verbindung und Analyse der Daten über die digitale Plattform kann eine Datendurchgängigkeit und Plattformintegration der involvierten Stakeholder gewährleistet werden.

⁴ Diese Abbildung diene als Vorlage für die Workshops.

Zweck ist zum einen das Lebenszyklusmanagement reibungslos ablaufen zu lassen und zum anderen eine CO₂-Transparenz zu ermöglichen und darauf aufbauend durch die digitalen Technologien zu entscheiden, welche R-Strategie zum Betriebsmittel gehört.

Die zweite Ebene gliedert das Geschäftsmodell in die operative Umsetzungsphase auf. Für die operative Umsetzungsphase ist es wichtig, neue Partnerschaften und ein Netzwerk aufzubauen. Ebenso ist es wichtig, die Kundengruppe zu kennen und genau zu definieren. Bei Autopilot können Betriebsmittelhersteller, Softwaredienstleister und Logistikdienstleister genannt werden, die zum Erfolg des Geschäftsmodells beitragen könnten. Kunden sind vor allem Automobilhersteller, Zulieferer und Anlagenbetreiber, die Betriebsmittel täglich nutzen.

Die dritte Ebene bezieht sich vor allem auf interne Faktoren. Da das Geschäftsmodell aus Aspekten wie Datenanalyse, Verteilung und Aggregation besteht, ist es wichtig, das Datenmanagement und -governance wegen der potenziellen Nutzung sensibler Daten zu betrachten. Hierbei kristallisierte sich heraus, welche Datenobjekte, Vertriebskanäle und Finanzierungsmöglichkeiten das Geschäftsmodell zur erfolgreichen Umsetzung benötigte. Anhand der Informationen zum Geschäftsmodell zu Autopilot konnte identifiziert werden, dass die Daten aus Sensoren gewonnen werden und aus Umweltbilanzen angereichert werden. Wichtige Datenarten sind für das Geschäftsmodell: Betriebs-, Material- und Lebenszyklusdaten, um eine Analyse von CO₂-Emissionen und den Qualitätsstand zu ermitteln.

Die letzte Ebene Umwelt betrachtet im Gegensatz zu den anderen Ebenen die makroökonomische Perspektive und stellt die externen Einflussfaktoren und potenziellen Auswirkungen dar. Beispielhafte externe Faktoren sind unter anderem die immer kürzeren Entwicklungszeiten, hohe Produktvarianz und allgemein der Marktdruck. Potenzielle Auswirkungen des Geschäftsmodells wären eine klimafreundlichere Produktion, Einhaltung der CO₂-Vorgaben und auch wirtschaftliche Erfolge wie reduzierte Kosten für die Instandhaltung.

Zusammenfassend ist Autopilot ein Geschäftsmodell, das zum einen Daten als CE-Aspekte berücksichtigt und in das Kern des Geschäftsmodells integriert. Positiv hervorgehoben ist, dass die digitale Plattform CE-Prinzipien umsetzt, indem eine transparente Darstellung des Lebenszyklus der Betriebsmittel aufgenommen und entsprechend der R-Strategien analysiert wird.

3.2.2 Geschäftsmodellerstellung

Umfeldanalyse und Bewertung

Um ein neues Geschäftsmodell zu entwickeln und zu modellieren, ist es ratsam, das makroökonomische Umfeld (Einflussfaktoren, Rahmenbedingungen, Wechselwirkungen) zu analysieren. Für Unternehmen ist es wichtig, sich ihres externen Umfelds bewusst zu sein, denn viele Faktoren können sie nicht beeinflussen und müssen in ihrer Strategie berücksichtigt werden. Das Umfeld ist volatil und ändert sich stetig, sodass auch die Strategie angepasst werden muss. Ohne die Beobachtung des Marktes, die Berücksichtigung externer Einflussfaktoren und die rechtzeitige Erkennung von Treibern für Veränderungen wird es für Unternehmen herausfordernd, wettbewerbsfähig zu bleiben. (Kaufmann 2021)

Als Analysetool diente die PESTEL-Analyse, die ein weit verbreitetes Managementwerkzeug ist. Einflussfaktoren und Mechanismen lassen sich in sechs makroökonomische Faktoren differenzieren: Political, Economic, Social, Technological, Ecological, Legal, die zusammen das Akronym „PESTEL“ bilden. (Kaufmann 2021; Leimeister 2020) Das Ergebnis dieser Analyse ist „eine Abbildung aller relevanten Einflussfaktoren, welche die [Strategie] mitunter entscheidend prägen können (Leimeister 2020, S. 118)“.

Zur Erstellung der PESTEL-Analyse und der darauffolgenden Handlungsempfehlungen wurde das dreiphasige Vorgehen gemäß Kaufmann (2021) befolgt. Zunächst wird festgelegt, auf welcher Ebene und aus welcher Perspektive die Analyse durchgeführt werden soll. Es sind verschiedene Sichten sinnvoll und möglich, denn so können unterschiedliche Ansichten und Trends bzgl. der verschiedenen Perspektiven identifiziert werden. Im zweiten Schritt werden die relevanten Einflussfaktoren analysiert. Dabei werden die relevanten externen Einflussfaktoren systematisch analysiert und verständlich beschrieben, um ihre Bedeutung und mögliche Auswirkungen auf ein Unternehmen zu erfassen. Auf dieser Grundlage werden Chancen und Risiken identifiziert, die anschließend als strategische Entscheidungsgrundlage dienen, beispielsweise in einem anderen Analysewerkzeug wie der SWOT-

Analyse oder der Trendanalyse. Im letzten Schritt werden auf Basis der identifizierten Chancen und Risiken Handlungsfelder und -schritte abgeleitet. (Kaufmann 2021)

Basierend auf dem hier vorgestellten Vorgehen wurde eine übergeordnete Perspektive eingenommen. Das Ziel bestand nicht darin, die Trends und externen Einflussfaktoren der OEMs zu verstehen, sondern eine vorgelagerte Perspektive in der Wertschöpfungskette. Daher wurde, um ein spezifischeres Bild der Gemeinsamkeiten und Unterschiede herauszukristallisieren, bewusst die Perspektive Zulieferer eingenommen.

Die Einflussfaktoren und Trends wurden mittels einer Desk-Research durchgeführt und auf die Automobilindustrie zutreffende Faktoren aufgenommen. Während der Analyse wurde explizit nach Trends und externen Einflussfaktoren nach dem Akteur Zulieferer gesucht und analysiert, die dann zusammengeführt wurden. Um die relevantesten Faktoren für die Automobilindustrie allgemeingültig zu identifizieren, wurden die Trends und Faktoren gegenübergestellt.

Die aus der Analyse herauskristallisierten Faktoren (Trends und Herausforderungen) sind in der Abbildung 12 dargestellt. Einzelne Faktoren und ihre auf die Akteure potenziellen Auswirkungen werden im Folgenden kurz erläutert:

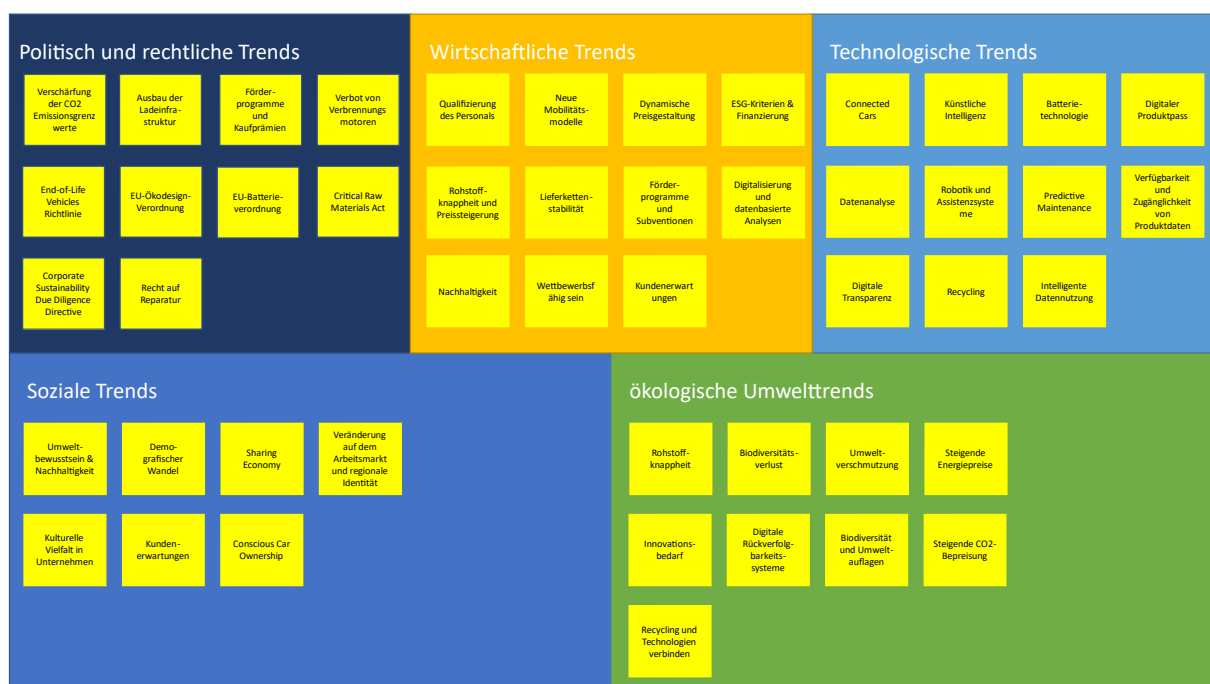


Abbildung 12: Übersicht der Einflussfaktoren

Politisch & Rechtlich

Der europäische Green Deal ist eines der wichtigsten politischen (EU-Ebene) Maßnahmenpakete, das als großes Ziel die Erreichung der ökologischen Nachhaltigkeit und die daraus ableitenden notwendigen Veränderungen für emissionsstarke Branchen setzt. Zweck des Paketes ist, dass Europa bis 2050 klimaneutral wird (European Commission 2024). Auf nationaler Ebene hat die deutsche Bundesregierung aufgrund des Europäischen Grünen Deals ein Maßnahmenpaket beschlossen, das den Verkehrs- und Straßensektor bis 2030 um 85 Mio. t CO₂-Äquivalente – also etwa die Hälfte des derzeitigen Ausstoßes – reduzieren soll. Daraus lassen sich Anforderungen bzgl. Emissionsausstoß, Ressourcennutzung und Veränderung der Lieferkette ableiten. Weitere für Zulieferer wichtige Verordnungen zur Nachhaltigkeit sind bspw. die End-of-Life-Vehicle-Richtlinie. Hierbei geht es um verstärkte Vorgaben für die Entsorgung, das Recycling und die Wiederaufbereitung sowie um die verbindlichen Rezyklatquoten für Verbrennerfahrzeuge. Bei Elektrofahrzeugen wird es außerdem verpflichtend, Sekundärrohstoffe beim Design und Bau neuer Batterien zu berücksichtigen. Diese in der EU-Batterieverordnung festgelegte Verpflichtung wirkt sich auf die Produktions- und Rohstoffstrategien der Batteriehersteller aus. (Expertenkreis Transformation der Automobilindustrie 2025; Fetting 2020)

Wirtschaftlich

Wirtschaftliche Einflussfaktoren der Automobilindustrie umfassen makroökonomische Bedingungen wie Wirtschaftswachstum, Inflation und Wechselkurse, die Kaufkraft und Investitionsentscheidungen. Ein zentraler Trend ist die Verknappung von Rohstoffen und der Anstieg der Rohstoffpreise, was Unternehmen dazu zwingt, resiliente und ressourceneffiziente Geschäftsmodelle zu entwickeln (Teichert et al. 2025).

Technologisch

Technologien wie Künstliche Intelligenz, Datenanalysen und neuere Batterietechnologien spielen hier eine große Rolle. Die Datennutzung wird wichtiger, was sich nicht nur in neuen Geschäftsmodellen widerspiegelt, sondern auch bei der Veränderung des Automobils (Hofmann et al. 2017; Sterck et al. 2022). Neben der Veränderung des reinen Fahrzeugs werden die Antriebstechnologien weiterentwickelt. Elektrobatterien bieten derzeit noch Potenzial zur Verbesserung, weshalb es wichtig ist, diese Technologien weiterzuentwickeln, um ihre Nachhaltigkeit, Effizienz und Widerstandsfähigkeit zu steigern (Plotnikov et al. 2023). Eine weitere neue technologische Entwicklung ist der digitale Produktpass, der im Jahr 2027 auf den Markt eingeführt werden soll. Er dient der Bereitstellung von Informationen zu den Komponenten und Materialien einer Batterie. Er soll weitere Informationen zur Produktverlängerung, wie bspw. Reparaturinformationen und Demontageanleitungen, enthalten, damit die Batterien langlebiger und somit nachhaltiger werden. (Plotnikov et al. 2023; Europäisches Parlament 2023) Die Entwicklung von Connected Cars steigt stetig, weil es zur Effizienzsteigerung im Service und Kundenzufriedenheit nützlich ist (Luckow et al. 2023).

Umwelt

Im Rahmen der ökologischen Umweltfaktoren konnten zwei Trends identifiziert werden. Zum einen handelt es sich um die Treibhausgasemissionen und zum anderen um die Optimierung der Materialien. Wie in der Einführung bereits erwähnt, sind die Unternehmen in der Automobilindustrie verantwortlich für einen hohen Ausstoß an Treibhausgasen. Neben der Produktion weist die Automobilindustrie auch über den gesamten Lebenszyklus – von der Rohstoffgewinnung bis zum Nutzungsende – vermehrt Treibhausgase aus (Kannegiesser et al. 2014). Politische Instrumente wie steigende Energiepreise und eine CO₂-Bepreisung nötigen Unternehmen bereits, auf grüne Energie umzusteigen. Weitere rechtliche und politische Vorgaben drängen die Akteure ebenfalls dazu, emissionsärmer und ressourceneffizienter zu werden sowie den Abfall zu minimieren (Verband der Automobilindustrie e.V. 2023)

Darüber hinaus besteht das Fahrzeug aus vielen Komponenten. Dementsprechend ist es wichtig, dass die Automobilzulieferer ressourcenschonendere Materialien einsetzen, indem das Produktdesign der Komponente entsprechend der Neuerungen angepasst wird. Sekundärrohstoffe, recyceltes Material oder wiederaufbereitete Produkte können in das Produktdesign im Rahmen der CE einfließen. Weitere Punkte, die dazu beitragen, sind optimierte Produktionsprozesse oder materialschonende Lagerhaltung. Bei der Kreislaufwirtschaftsstrategie Recycling ist das Produkt Fahrzeug vorteilhaft, denn an seinem Produktlebensende können die Komponenten im Fahrzeug bis zu 85% recycelt werden. (Verband der Automobilindustrie e.V. 2023)

Die Elektrofahrzeuge sind getrennt zu den reinen Verbrenner zu betrachten. Auch hier werden seltene Rohstoffe gewonnen, um die Batterie zu produzieren. Eine Folge ist daher, dass geopolitische Abhängigkeiten entstehen können. Eine Maßnahme ist, um diese Probleme zu eliminieren, ist die Umsetzung von CE-Materialien. (Plotnikov et al. 2023)

Sozial

In dieser Kategorie wird das Bild der Konsumenten abgebildet. In Bezug auf die Automobilindustrie ist auffällig, dass die Nachfrage der Verbraucher nach langlebigen, reparierbaren und ressourcenschonenden Produkten steigt. (Rade 2024) Ein weiterer identifizierter Trend ist die Alternative Mobilitätsform Carsharing im Sinne der „Sharing Economy“. Das Geschäftsmodell sagt aus, dass ein Unternehmen Fahrzeuge besitzt und Kunden diese flexibel nutzen können und nur für die Fahrstrecke bezahlen (Belk 2014). In den letzten Jahren nahm die Anzahl an Nutzenden zu, insgesamt waren 2024 5,5 Mio. Nutzende registriert. Dieser Anstieg spiegelt sich auch im Ausbau der Angebote wider (Bundesverband CarSharing 2024). Ein weiterer sozialer Faktor, der sich auf die Automobilindustrie bezieht, ist, dass diese Branche (inkl. Zulieferer, Autohändler und Services) ein zentraler Arbeitgeber für Personen in der Europäischen Union ist. Aufgrund der schlechten Auftragslage, werden Arbeitsplätze abgebaut. Darüber hinaus fehlen der Automobilindustrie

Fachkräfte, insbesondere hoch qualifizierte Fachkräfte, die dringend gesucht werden, wie bspw. Experten für Informatik oder BWL (Tiedemann und Kunath 2024).

Zusammenfassend wird deutlich, dass die PESTEL-Analyse verschiedene externe Einflussfaktoren und Trends identifiziert hat, die die Automobilindustrie derzeit und in Zukunft beeinflussen bzw. beeinflussen werden. Es wird deutlich, dass diese von einem komplexen und dynamischen Umfeld geprägt ist.

Politisch-rechtliche Rahmenbedingungen, wie die EU-Ökodesign- und Batterie-Verordnung sowie strengere CO₂-Grenzwerte, erzeugen Anpassungsdruck und haben das Potenzial, die Transformation zu beschleunigen. Geschäftsmodelle, Prozesse und Produktstrategien müssen entsprechend angepasst werden.

Das Nachhaltigkeitsparadigma wirkt als Querschnittsfaktor. Rohstoffknappheit, Umweltverschmutzung, steigende Energiepreise und CO₂-Bepreisung beeinflussen die ökonomische, technologische und gesellschaftliche Dimension. Nachhaltigkeit ist somit ein konstitutiver Bestandteil zukunftsfähiger Geschäftsmodelle. Ihre Vernachlässigung zieht Wettbewerbsnachteile nach sich.

Auch die Nachfragestruktur wandelt sich: Nutzungs- und serviceorientierte Mobilitätskonzepte gewinnen insbesondere bei jüngeren Generationen an Bedeutung und erfordern die Neuausrichtung bestehender Geschäftsmodelle.

Digitale Technologien wie Künstliche Intelligenz, datenbasierte Ansätze und der Digitale Produktpass erhöhen die Transparenz entlang der Wertschöpfungskette und unterstützen Entscheidungen. Digitalisierung und Nachhaltigkeit wirken komplementär und schaffen neue Wertschöpfungslogiken.

Abschließend lässt sich festhalten, dass die Integration von Kreislaufwirtschaftsstrategien in ein Geschäftsmodell der Zulieferer durch regulatorischen Druck, Nachhaltigkeit, veränderte Konsummuster und technologische Innovationen bestimmt wird. Um nachhaltige und zirkuläre Geschäftsmodelle zu entwickeln und die Wettbewerbsfähigkeit langfristig zu sichern, ist eine systemische, integrierte und datenbasierte Herangehensweise erforderlich.

Handlungsempfehlungen zur Umsetzung passender Geschäftsmodelle

Abschließend lassen sich Handlungsempfehlungen auf den im AP 1.2 gewonnenen Erkenntnissen bilden, die Unternehmen aus der Automobilbranche bei der Neugestaltung und Weiterentwicklung von zirkulären Geschäftsmodellen unterstützen sollen. Insbesondere liegt der Fokus bei der Bildung von zirkulären Geschäftsmodellen auf dem Einsatz von digitalen Technologien und Daten als Kernressource. Insgesamt konnten sechs Handlungsempfehlungen sichergestellt werden, die für Unternehmen im Kontext der Geschäftsmodellentwicklung hilfreich sein können.

1. Kooperationen mit Start-ups gezielt fördern

Während der dreijährigen Untersuchung neuer datengetriebener Geschäftsmodelle im Kontext der CE ist deutlich geworden, dass Start-ups zunehmend wirtschaftliches Potenzial erkennen. Sie finden Lösungen für Probleme, die von etablierten Unternehmen verursacht wurden oder die diese selbst nicht lösen können. Große Herausforderungen in der Automobilindustrie sind beispielsweise die fehlende Transparenz in der Lieferkette, das Fehlen von Kooperationen oder fehlende Nachweise. Hier setzen Start-ups an, um diese Herausforderungen zu lösen und einen Mehrwert für die Unternehmen der Automobilindustrie zu liefern. Es ist daher empfehlenswert, dass sich automobilspezifische Unternehmen aktiv mit Start-ups auseinandersetzen, ihre Geschäftsmodellideen analysieren und entscheiden, ob und wie sie kooperieren können. Kooperationsmöglichkeiten können beispielsweise darin bestehen, dass Unternehmen einfach zu Kunden der Start-ups werden, weitere Möglichkeiten wären Investitionen oder die Gründung von Joint Ventures. Um dieses Ziel umzusetzen, können die im AP 1.2 entwickelten Taxonomie und Archetypen unterstützend wirken. Die Taxonomie kann dabei helfen, den aktuellen Stand der Geschäftsmodellmuster zu erfassen. Die Archetypen spiegeln diesen Stand wider. Wiederkehrende Muster wurden zusammengefasst und zu Geschäftsmodelltypen gebildet. Unternehmen können die Innovationsfähigkeit fördern, indem sie diese Muster nachahmen, ein neues Geschäftsmodell entwickeln, aufbauen und schließlich in den Markt einführen.

2. Schwachstellenanalyse entlang des Produktlebenszyklus

Eine weitere Handlungsempfehlung, die sich vor allem aus der Analyse datengetriebener Start-ups ableiten ließ, ist die Schwachstellenanalyse der Produkte. Es zeigte sich, dass viele

automobilspezifische Produkte einen großen Produktfußabdruck besitzen, bzw. dass dieser aufgrund der Intransparenz in der Lieferkette noch nicht wirklich erfasst werden kann. Allerdings wird die Forderung, den Produktfußabdruck anzugeben und sich über den CO₂-Ausstoß entlang der Lieferkette bewusst zu werden, immer größer.

Daher wird Unternehmen empfohlen, sich bewusst mit ihren Produkten auseinanderzusetzen, einen qualitativ hochwertigen Wert zu ermitteln und sich somit der Schwachstellen bezüglich der Nicht-Einhaltung der Nachhaltigkeit entlang der Lieferkette bzw. des Produktlebenszyklus bewusst zu werden. Nachdem die Schwachstellen aufgedeckt wurden, kann das Produktdesign angepasst oder andere Maßnahmen ergriffen werden, um das Produkt nachhaltiger zu gestalten.

Insbesondere hilft dabei die Analysemethode LCA (Life Cycle Assessment). Die LCA-Methode bietet einen strukturierten Leitfaden, wie der CO₂-Fußabdruck eines Produkts oder Prozesses berechnet werden kann, von der Rohstoffentnahme bis zur endgültigen Entsorgung. Dies kann mit der ISO 14040/44 durchgeführt werden. Neben der LCA bietet auch die Aufzeichnung der aktuellen Wertschöpfungskette das Potenzial, Schwachstellen zu erkennen. Wenn dies aufgrund fehlender Kompetenzen, etwa durch mangelnde Weiterbildung in diesem Bereich, und begrenzter Ressourcen, beispielsweise infolge des Fachkräftemangels, nicht eigenständig durchgeführt werden kann, können Start-ups unterstützend hinzugezogen werden.

3. Nutzung eines iterativen vorgegebenen Entwicklungsmethode

Die Geschäftsmodelltransformation ist ein aufwendiges und komplexes Vorgehen. Insbesondere KMUs zeigen Schwierigkeiten auf, die richtigen Schritte zu finden und umzusetzen. In der Literatur gibt es viele verschiedene Schritte zur Geschäftsmodellentwicklung, jedoch kaum zusammenhängende Lösungen.

Im Rahmen des Projektes DIONA wurde eine für KMU speziell entwickelte Geschäftsmodellmethodik entwickelt, die im weiteren Verlauf erläutert wird (s. O). Das Besondere an dieser Methodik ist, dass sie zum einen extra für KMUs entwickelt wurde und zum anderen situative Faktoren betrachtet. Das bedeutet, dass nicht jedes Unternehmen dem gleichen Vorgehen folgt, sondern eher seinem Need und seinem Unternehmensaufbau.

4. Innovationskultur und Offenheit fördern

Unternehmen müssen sich auch intern neu aufstellen. CE und der Einsatz digitaler Technologien sind neue Bereiche, in denen nur wenige Mitarbeitende Erfahrungen haben, insbesondere in Kombination mit neuen Geschäftsmodellen. Es ist wichtig, die Kreativität und die eigenen Ideen der Mitarbeitenden zu fördern. Dies kann nur gelingen, wenn Offenheit gegenüber dieser Veränderung und ihren Auswirkungen besteht.

Neben allgemeinen Workshops über CE (siehe DIONAs Workshopserie) können auch auf spezifische Aspekte entwickelte Canvases hilfreich sein. Im AP 1.2 wurde mit dem Smart Circular Canvas ein neues Managementtool entwickelt, das die kombinierte Entwicklung von datengetriebenen und zirkulären Geschäftsmodellen ermöglicht. Mit diesem Canvas sollen Stakeholder aus Unternehmen oder Start-ups dafür sensibilisiert werden, welchen Mehrwert Daten für kreislauffähige Geschäftsmodelle bieten können.

5. Forschungspotenziale gezielt nutzen

Während der Analyse von Start-ups zeigte sich, dass sich einige von ihnen aus Forschungsprojekten entwickelt haben. Ein Beispiel für ein erfolgreiches Start-up, das aus einem Forschungsprojekt hervorgegangen ist, ist TWAICE aus München. Die Gründer engagieren sich zudem aktiv im Entrepreneurcenter UnternehmerTUM, da sie einerseits von Trainings bei der Ausgründung und Finanzierung profitierten und andererseits studentischen Nachwuchs zur Ausweitung des Teams gewinnen konnten. Dementsprechend ist es wichtig, bei Forschungsprojekten auch das wirtschaftliche Verwertungspotenzial zu berücksichtigen.

Daher kann es für Unternehmen sinnvoll sein, sich aktiv in diesen Netzwerken zu engagieren und ihre Probleme bewusst in Forschungsprojekten zu adressieren, da sich so verschiedene zukünftige Möglichkeiten wie beispielsweise eine Ausgründung zu einem Start-up oder die Bildung eines Joint Ventures ergeben können.

6. Kontinuierliche Praxisintegration

Wie in der fünften Handlungsempfehlung beschrieben, ist ein kontinuierlicher Austausch wichtig. Zum einen werden so immer wieder neues Wissen und der aktuelle Stand externer Trends und Herausforderungen aufgenommen. Zum anderen kann auch Feedback zu einer potenziellen Geschäftsmodellinnovation eingeholt werden. Feedback ist wichtig, denn es spiegelt den Status Quo der Trends wider. Fällt das Feedback positiv aus, wird deutlich, dass das Wertversprechen der Geschäftsmodellinnovation zukünftige Kunden anspricht. Ebenso wichtig ist die kontinuierliche Analyse von Trends und Herausforderungen, um zu erörtern, ob die Geschäftsmodellidee oder -innovation das Problem trifft und eine Lösung anbietet. Darüber hinaus ist es wichtig, dass Unternehmen ständig mit verschiedenen Stakeholdern im Gespräch sind, um verschiedene Meinungen zu erhalten und potenziell wichtige Partnerschaften aufzubauen.

Tabelle 4: Handlungsempfehlungen

	Handlungsempfehlung	Begründung	Ziele	Hilfestellung / Methoden
1	Kooperationen mit Start-ups strategisch ausbauen	Start-ups verfügen über hohe Innovationskraft, agieren agiler als etablierte Firmen und bringen neue Lösungsansätze ein. Sie können KMU und große Unternehmen bei der Entwicklung zirkulärer Lösungen gezielt unterstützen.	Erhöhung der Innovationsfähigkeit und organisationalen Agilität; Identifikation passender Partner („Perfect Fit“)	Einsatz von Taxonomien und Archetypen zirkulärer Geschäftsmodelle zur strukturierten Partnerauswahl
2	Systematische Schwachstellenanalyse entlang des Produktlebenszyklus	Um zirkuläre Potenziale zu heben, müssen Design-, Prozess- und Nutzungs-Schwachstellen sichtbar werden. Start-ups können gezielt in kritischen Bereichen eingebunden werden.	Identifikation von Optimierungspotenzialen in Design, Nutzung und End-of-Life; Ableitung zirkulärer Maßnahmen	LCA (Life Cycle Assessment), Value Chain Mapping, Archetypen für zirkuläre Strategien
3	Nutzung eines iterativen vorgegebenen Entwicklungsmethode	Zu wenig strukturiertes Vorgehen; ineffizientes Vorgehen; kein zuverlässiges Gelingen	Erfolgreiches Gelingen vom Konzept zur anwendungsorientierten Umsetzung	Methodik zur Entwicklung zirkulärer Geschäftsmodelle für KMU (s. 0)
4	Innovationskultur und Offenheit im Unternehmen fördern	Häufig mangelt es intern an Wissen, Motivation oder Offenheit gegenüber zirkulären Geschäftsmodellen und neuen Partnerschaften.	Stärkung der internen Bereitschaft für Veränderung; Förderung von Kooperationen und Ideenentwicklung	Workshops, Nutzung von Canvas-Methoden (z. B. Circular Canvas), interne Innovationsformate
5	Forschungspotenziale aktiv nutzen und in Geschäftsmodelle überführen	Forschung liefert Impulse für neue Start-ups und kann zur Kommerzialisierung von	Bewertung des wirtschaftlichen Verwertungspotenzials; Entwicklung neuer Geschäftsmodelle, Spin-offs oder Joint Ventures	Kooperation mit universitären Start-up-Zentren, Teilnahme an Transferprojekten, Netzwerkevents

		Erkenntnissen führen.		
6	Kontinuierliche Integration von und im Praxiswissen Austausch im Ökosystem	Ständige Veränderungen in Technologie, Regularien und Märkten erfordern laufenden Austausch und Feedback.	Aufbau eines dynamischen Ökosystems; Entwicklung neuer Partnerschaften; kontinuierliche Wissenserweiterung	Interdisziplinäre Netzwerkevents, Austausch mit Industrie, Forschung, Politik; Teilnahme an Innovationsclustern

Anpassungsbedarfe für Geschäftsprozesse in der Kreislaufwirtschaft

Zur Entwicklung einer CE ist es notwendig, jene Geschäftsprozesse zu identifizieren, die weiterhin an linearen Wirtschaftsstrukturen festhalten, um sie gemäß den Prinzipien der CE anzupassen. Darüber hinaus müssen die notwendigen Anpassungsbedarfe systematisiert und ihr Mehrwert anhand exemplarischer Anwendungsbeispiele gegenüber der Industrie kommuniziert werden. Zur Dissemination wurde ein Workshop auf Basis der erarbeiteten Ergebnisse konzipiert, der im Verlauf des DIONA-Projekts mehrfach durchgeführt wurde. Der Workshop dient als Ergebnisartefakt für die Forschung im AP1.2.1, welche aktuelle wissenschaftliche Literatur sowie Expertenwissen aus Experteninterviews konsolidiert. Die Entwicklung der im Workshop adressierten Inhalte wird nachfolgend beschrieben. Die Umgebung der Workshopdurchführung wird im AP 4 zum Cyberphysischen Labor vorgestellt.

Für die Identifikation der von der CE betroffenen Geschäftsprozesse wurden zunächst etablierte GPM- und IT-Service-Standards wie das Cross Industry Process Framework der APQC sowie ITIL 4 analysiert (Axelos 2019; APQC 2023). Weiterentwicklungen des Wertschöpfungsmodells nach Porter, die sich auf die CE beziehen, wurden auch bei der Abgrenzung herangezogen. Aus dem daraus resultierenden Überblick wurden anschließend jene Prozesse eingegrenzt, die für die CE besonders relevant sind. Das Wertschöpfungsmodell von Eisenreich et al. (2022) gestaltet die Wertschöpfungskette nicht länger linear, sondern zirkulär und beschreibt, welche Disziplinen notwendig sind, um die Wertschöpfung in einem Wiederverwertungskreislauf zu gestalten. Sie besteht aus den Schritten Eingangslogistik, Operationen, Ausgangslogistik, Marketing & Vertrieb, Kundendienst sowie der Rückführlogistik. Verschiedene Studien, wie auch diese, betonen, dass insbesondere der Kundendienst bzw. das After-Sales und die Rückführlogistik ausgebaut werden müssen, um Wertschöpfungskreisläufe zu schließen (Tkaczyk et al. 2025; Dombrowski et al. 2020; Lasch 2023).

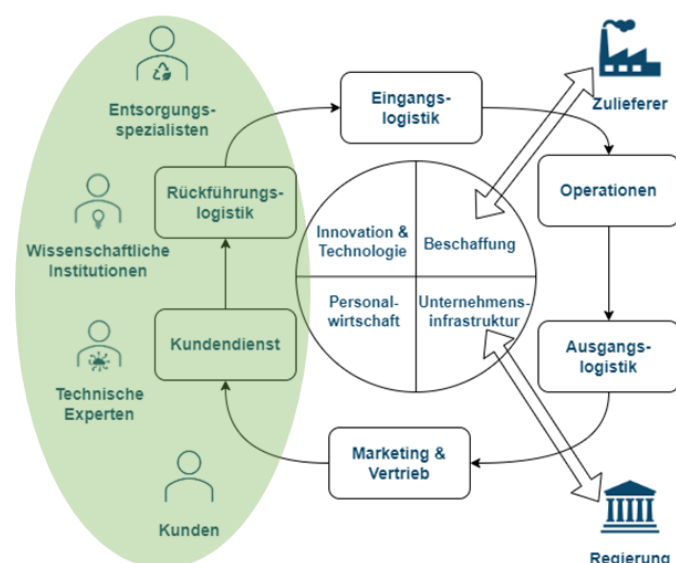


Abbildung 13: Wertschöpfungskreislauf nach Eisenreich (Eisenreich et al. 2022)

Das After-Sales umfasst alle Dienstleistungen, die Kunden in der Nutzungsphase eines Produkts angeboten werden. Die Rückführungslogistik befasst sich mit den Rückflüssen von Materialien, Verpackungen, Halb- und Fertigprodukten, die erneut in Lieferketten eingeschleust werden (Lasch 2023). Folgende Tabelle 5 beschreibt typische After-Sales- und Rückführungslogistikprozesse:

Tabelle 5: After-Sales- und Rückführungslogistikprozesse

After-Sales Prozesse (Dombrowski et al. 2020)	Redistributionslogistik (Lasch 2023)
• Teiledienst • Ersatzteilerstellung • Nachserienversorgung • Kundendienst • Wartung • Inspektion • Instandsetzung • Schulung/Training • Garantie • Zubehör • Lizenzierung • Leistungserweiterung • Individualisierung	• Retouren • Recycling und Entsorgung • Transportmanagement • Lagerverwaltung • Compliance und Regulierung

Genau betrachtet sind alle Bereiche des Value-Chain-Modells relevante Prozesse der CE: vom Produktdesign und der nachhaltigen Beschaffung über eine zero-waste-orientierte Produktion und Nachhaltigkeitszertifizierung bis hin zu kundenseitigen Wertschöpfungsprozessen, die Nutzungsdaten generieren. Viele Unternehmen weisen jedoch gerade in After-Sales und Rückführungslogistik bislang geringe Kompetenzentwicklungen auf. Zu den zentralen Ursachen zählen mangelnde Initiative des Top-Managements, geringe Transparenz im Recycling und der Wiederverwendung, Schwierigkeiten bei der Abfalltrennung sowie eine geringe Kapitalrendite (Sonar et al. 2024). Der Workshop wurde daher gezielt darauf ausgerichtet, die Kompetenzentwicklung in diesen beiden Bereichen zu fördern.

Neben den Geschäftsprozessen wurden, wie oben beschrieben, zirkuläre Geschäftsmodelle untersucht. Sie betonen die Erhaltung des ökologischen und ökonomischen Werts eines Produkts oder einer Dienstleistung (Centobelli et al. 2020). Dazu gehören Design-for-X-Modelle, die sich auf die Verlängerung von Produktlebenszyklen fokussieren (z. B. Design-for-Repair, Design-for-Disassembly, Design-for-Durability, Design-for-Upgrading), Product-as-a-Service Modelle, Sharing- und Plattformmodelle sowie Geschäftsmodelle der Sekundärrohstoffbeschaffung und -verwendung (Centobelli et al. 2020; Elzinga et al. 2020). Diese Modelle basieren auf dienstleistungsorientierten Produktangeboten, gemeinsamer Nutzung sowie Beschaffung und Wiederverwendung von Produkten. Es zeigt sich jedoch auch, dass ein hoher technologischer Reifegrad zur Umsetzung der unterliegenden Geschäftsprozesse erforderlich ist. Product-as-a-Service- und Sharing-Modelle setzen oft Digitale Zwillinge bzw. digitale Schatten voraus, um die Produktnutzung erfassen und verwalten zu können. Dementsprechend ist ein umfangreiches technisches Know-how zu IT-Services für die Umgestaltung von Geschäftsprozessen in der CE unverzichtbar.

Daher wurden die im AP1.3 entwickelten Inhalte zur digitalen Unterstützung von Geschäftsprozessen in die Workshopkonzeption integriert. Der Workshop beschreibt Industrie-4.0-Technologien wie Digitale Zwillinge, Analytics, Trackingtechnologien und KI und erläutert deren Zusammenhänge sowie ihre Bedeutung für die Datensammlung, Datenintegration und Automatisierung. Ziel war es, Teilnehmende bei der Strukturierung ihrer technischen Anpassungsbedarfe zu unterstützen. Hierzu wurde im Workshop erarbeitet, inwieweit die Teilnehmer digitale Technologien im Alltag kennengelernt haben, und welche Auswirkungen diese auf das eigene Verhalten haben. Anschließend erhielten Teilnehmende fiktive Prozesslog-Dateien und sollten mittels generativer KI überprüfen, welche Prozessoptimierungsmöglichkeiten erkennbar sind. Obwohl diese Optimierungsmöglichkeiten durch analoge Analyse schwer erkennbar waren, konnten diese mittels generativer KI umgehend erkannt werden. Auch wurde das DIKW-Hierarchie Modell herangezogen, um spezifische Technologien mit den jeweiligen Kompetenzfeldern ‚Daten sammeln‘, ‚Daten integrieren‘ und ‚Daten analysieren‘ zu verknüpfen. Das Modell, basierend auf Liu et al. 2022, spezifiziert

wie digitale Technologien in Unternehmen eingesetzt werden. Liu et al. nutzen dieses Modell, um zu erklären, wie diese Kompetenzfelder in den jeweiligen Phasen der R-Prinzipien eingesetzt werden. Die Verknüpfung von spezifischen Technologien mit den Kompetenzfeldern ist innerhalb der Forschung zu AP1.3 entstanden.

Zur Entwicklung von Richtlinien für die Anpassung von Geschäftsprozessen sind verschiedene Prozess-Redesign-Methoden untersucht worden, um zu überprüfen, welche sich am besten für die Entwicklung kreislauffähiger Geschäftsprozesse eignen. Gross et al. identifizierte 16 Methoden, die für das Redesign von Geschäftsprozessen eingesetzt werden (Gross et al. 2021). Geschäftsprozesse lassen sich grundsätzlich auf zwei Arten anpassen: Einerseits können Prozessaktivitäten im Sinne der Kostenoptimierung umstrukturiert oder entfernt werden; andererseits können neue Aktivitäten ergänzt werden, um neue Wertschöpfungsmuster zu schaffen (Ahmad und van Looy 2020). Der erste Ansatz beruht auf Qualitätsmanagementansätze wie Six Sigma, Lean Management, Kaizen, welche auf die Minimierung der Fehlertoleranz sowie Ineffizienzen abzielen. Die zweite Variante erhöht zunächst die Kosten eines Prozesses, verändert jedoch die Interaktion zwischen Unternehmen, Kunden und Mitarbeitenden und somit die Wertschöpfung. Besonders das Hinzufügen neuer Prozessaktivitäten, auch als das exploratives Prozessmanagement bezeichnet, wurde als Kernkompetenz zur Anpassung von Geschäftsprozessen für die CE identifiziert. Neben neuen Wertschöpfungsmöglichkeiten, die durch Prozessentwurfsmuster beschrieben werden, thematisiert das explorative Prozessmanagement auch Methoden zur Geschäftsprozessgestaltung (Grisold et al. 2022); (Rosemann 2020). Das explorative GPM unterstützt dabei Anpassungsbedarfe zu strukturieren und neue Wertschöpfungsmuster zu identifizieren.

Zur Systematisierung der Anpassungsbedarfe wurde daher die 5-Diamonds-Methode als Werkzeug genutzt. Diese Methode unterstützt dabei, neue Wertversprechen zu integrieren und gleichzeitig digitale Technologien und geschäftliche Anforderungen zu berücksichtigen (Grisold et al. 2022). In jedem Diamanten werden mithilfe divergenter und konvergenter Denkansätze sowohl Geschäfts- als auch Technologietrends identifiziert und über vordefinierte Geschäftsprozessmuster in den Prozess integriert. Für den Workshop wurde die Methode auf die zirkuläre Wertschöpfung angepasst, welche als Richtlinie für die Anpassung von Geschäftsprozessen fungieren. Am Beispiel einer Kfz-Werkstatt wird die Methode exemplarisch im Workshop eingesetzt, um Reparatur- und Wartungsprozesse nezugestalten. Teilnehmende analysieren, inwiefern der Wartungsprozess von Automobilen, im Sinne der CE, optimiert werden können. Die identifizierten Optimierungsmöglichkeiten basieren auf Analysen moderner Werkstattprozesse sowie einem Interview mit einem Kfz-Mechatroniker. Sie umfassen Ideen zur digitalen Terminvergabe, prädiktiven Wartung, personalisierten Kundenbereichen und der Integration in Ersatzfahrzeugverleihprozesse. Die Workshops wurden im Verlauf von DIONA mehrfach verprobt und kontinuierlich weiterentwickelt, um die Möglichkeiten des Einsatzes digitaler Technologien für die zirkuläre Prozessinnovation aufzuzeigen.

Mittels mehrfacher Durchführung und Auswertung der Workshops konnte Feedback zu den Ansätzen aus der Wissenschaft gesammelt werden, welches wiederum zur Validierung der Anpassungsbedarfe zu Geschäftsprozessen beigetragen hat.

Zusammenfassung

Für die Entwicklung einer CE müssen Geschäftsprozesse identifiziert und angepasst werden, die noch linearen Strukturen folgen. Besonders relevant sind After-Sales und Rückführungslogistik, da Unternehmen in diesen Bereichen bisher geringe Kompetenzen aufweisen. Der entwickelte Workshop im DIONA-Projekt vermittelt die notwendigen Anpassungsbedarfe und zeigt, wie zirkuläre Geschäftsprozesse und Geschäftsmodelle, beispielsweise Design-for-X oder Product-as-a-Service, unterstützt werden können. Dafür werden Prozessentwurfsmuster und Industrie-4.0-Technologien wie Digitale Zwillinge, Analytics oder KI erläutert.

Zur systematischen Gestaltung neuer Wertschöpfungsmuster wird das explorative GPM eingesetzt, insbesondere die 5-Diamonds-Methode. Anhand einer Kfz-Werkstatt wird exemplarisch gezeigt, wie Wartungs- und Reparaturprozesse für die CE optimiert werden können, etwa durch prädiktive Wartung oder digitale Serviceprozesse. Insgesamt bietet der Workshop ein strukturiertes Vorgehen, um technische und organisatorische Anforderungen zirkulärer Geschäftsprozesse praxisnah aufzubereiten. Des Weiteren dient der Workshop als Konsolidierung der Forschungsergebnisse aus AP1.2.1, indem es die durch CE beeinflussten Geschäftsprozesse eingrenzt, die Anpassungsbedarfe systematisiert und ausgewählte Geschäftsprozesse adaptiert.

Methodik zur Entwicklung zirkulärer Geschäftsmodelle für KMU

Die Transformation von Geschäftsmodellen in Richtung CE stellt KMU vor erhebliche Herausforderungen. Die Untersuchung zeigte, dass bestehende Ansätze entweder zu abstrakt oder zu komplex für KMU sind und eine geringe Integration aufweisen. Die nachfolgenden Darstellungen präsentieren eine situative Methodik auf Basis des Situational Method Engineering (SME), die Kontextfaktoren entlang des TOE-Frameworks (Tornatzky und Fleischer 1990) systematisiert und einen modularen Werkzeugkasten mit zehn Methodenfragmenten bereitstellt. Die Methodik integriert bewusst analytische, konzeptionelle, anwendungsorientierte und empirisch verankerte Elemente und adressiert damit drei identifizierte Forschungslücken: fehlende Integration von Bewertung und Umsetzung, mangelnde KMU-Operationalisierung und unzureichende Betrachtung systemischer Wechselwirkungen. Der Beitrag zeigt, wie das SME-Konzept auf die Domäne der zirkulären Geschäftsmodellinnovation übertragen werden kann.

Vorgehen

Das Vorhaben folgte dem Design-Science-Research-Ansatz (DSR) nach (Peppers et al. 2007) und

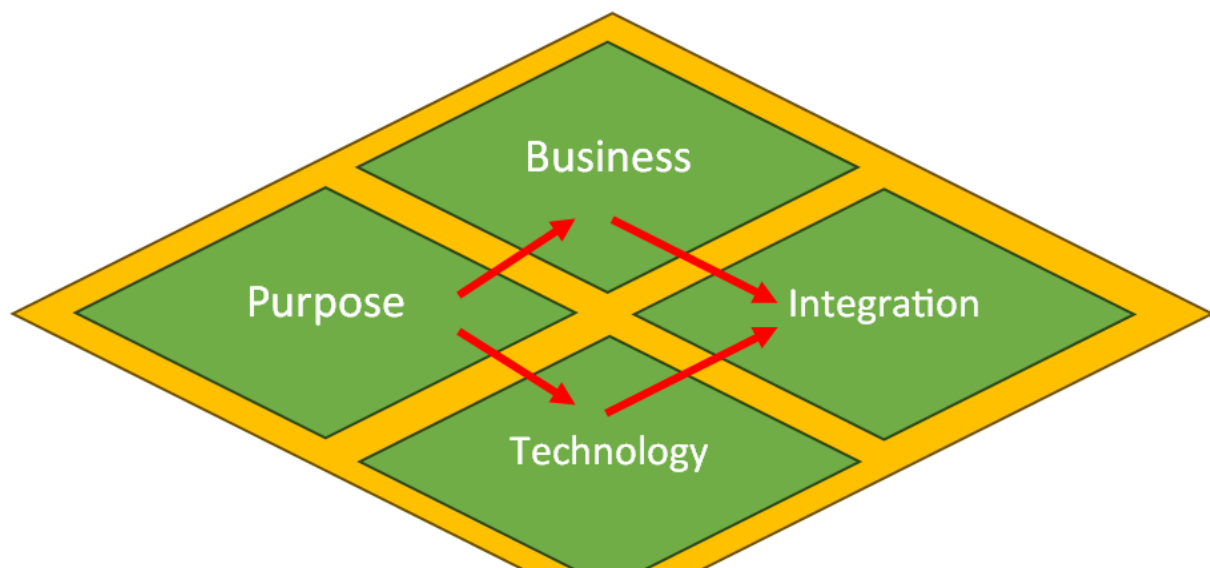


Abbildung 14: Überblick zur 5-Diamonds Methode

gliederte sich in fünf iterative Entwicklungszyklen. Im ersten Zyklus wurde ein systematisches Literaturreview zu bestehenden CE-Methoden für KMU durchgeführt. Die Suche erfolgte in den Datenbanken Scopus, Web of Science, AIS Electronic Library und IEEE Xplore und ergab zunächst 194 Treffer, die nach Duplikatbereinigung auf 168, nach Screening von Titel und Abstract auf 38 und nach Volltextanalyse auf 21 finale Beiträge reduziert wurden. Die Kodierung erfolgte durch zwei Forschende unabhängig voneinander mit konsensuellem Abgleich. Das Review lieferte eine Typisierung bestehender Ansätze in vier Grundtypen, die Identifikation von vier CE-Dimensionen sowie drei zentrale Forschungslücken.

Darauf aufbauend widmete sich der zweite Zyklus der Kontextfaktorenanalyse. Mittels einer weiteren systematischen Literaturreview wurden Einflussfaktoren auf die CE-Geschäftsmodellinnovation in KMU identifiziert und entlang des TOE-Frameworks (Technology–Organization–Environment) strukturiert. Es ergaben sich 11 Hauptvariablen in drei Dimensionen.

Im dritten Zyklus wurden zwei komplementäre Canvas-Ansätze in Praxisworkshops im cyber-physischen Labor erprobt: das BMC mit Recovery Modules nach (Braun et al. 2021) für produktzentrierte Rückführungsstrategien sowie das Smart Circular Canvas für datengetriebene Geschäftsmodelle. Die Workshops lieferten erprobte Methodenfragmente und Erkenntnisse zu deren jeweiligen Anwendungskontexten.

Der vierte Zyklus untersuchte die Einsatzmöglichkeiten von Künstlicher Intelligenz in der Geschäftsmodellinnovation. Auf Basis von vier qualitativen Interviews und einer begleitenden Literaturanalyse wurden die KI-Anwendungen entlang des Double-Diamond-Modells (Design Council) systematisiert und in einem Whitepaper dokumentiert.

Im fünften Zyklus wurden sämtliche Ergebnisse in die situative Methodik zusammengeführt, bestehend aus Zuordnungsmatrix, Situationsprofilen und Vorgehensmodell. Die Methodik wurde am 25.11.2025 in einem Workshop mit KMU-Vertretern evaluiert.

State-of-the-Art – Methoden der Entwicklung von zirkulären KMU-Geschäftsmodellen

Das systematische Literaturreview identifizierte vier Grundtypen bestehender Ansätze zur Entwicklung zirkulärer Geschäftsmodelle in KMU. Der erste Typ umfasst Entscheidungs- und Bewertungsmodelle, die auf multikriteriellen Methoden basieren und verschiedene Geschäftsmodellalternativen anhand ökonomischer, ökologischer und sozialer Kriterien vergleichen. Diese Ansätze zeichnen sich durch eine hohe analytische Tiefe aus, erfordern jedoch spezifische methodische Kenntnisse und sind daher für KMU nur eingeschränkt zugänglich. Den zweiten Typ bilden konzeptionelle Frameworks, die die Transformation von Geschäftsmodellen über mehrere Ebenen strukturieren und damit Orientierung bieten, jedoch häufig auf einem abstrakten Niveau verbleiben und nur begrenzte konkrete Umsetzungshilfen liefern. Der dritte Typ umfasst anwendungsorientierte Tools wie Canvas-basierte Ansätze oder digitale Selbstbewertungsinstrumente, die durch ihre Zugänglichkeit und Praktikabilität überzeugen, allerdings oft ohne tiefergehende analytische Fundierung auskommen. Der vierte Typ schließlich besteht aus empirischen Studien, die Barrieren, Erfolgsfaktoren und Strategien identifizieren und daraus Handlungsempfehlungen ableiten, ohne jedoch konkrete Instrumente für die Umsetzung bereitzustellen.

Neben dieser Typisierung identifizierte das Review vier CE-Dimensionen, die für eine ganzheitliche Transformation integriert adressiert werden müssen: Ressourcen und Material, GM-Transformation und Wertschöpfungslogik, organisationale Faktoren wie Kompetenzen und Unternehmenskultur sowie Netzwerke und Stakeholder. Aus der Synthese ließen sich drei zentrale Forschungslücken ableiten: Erstens fehlt es an integrierten Ansätzen, die Bewertung und Umsetzung von Geschäftsmodellen miteinander verbinden. Zweitens mangelt es an einer konsequenten Operationalisierung für KMU, die deren spezifische Rahmenbedingungen berücksichtigt. Drittens werden systemische Wechselwirkungen zwischen internen und externen Faktoren bislang nur unzureichend betrachtet.

Die entwickelte situative Methodik positioniert sich als integrativer Ansatz, der die Stärken aller vier Ansatztypen kombiniert und die drei identifizierten Forschungslücken gezielt adressiert. Die fehlende Integration von Bewertung und Umsetzung wird durch die Zuordnungsmatrix geschlossen, die Situationsanalyse direkt mit konkreten Methodenfragmenten verknüpft. Der mangelnden KMU-Operationalisierung begegnet die Methodik durch kontextadaptive Situationsprofile und ein dreistufiges Assessment, das die heterogenen Rahmenbedingungen systematisch erfasst. Die unzureichende Betrachtung systemischer Wechselwirkungen wird durch die TOE-Systematik adressiert, die technologische, organisatorische und umfeldbezogene Faktoren integriert und durch die vier CE-Dimensionen eine ganzheitliche Perspektive sicherstellt.

Situationsanalyse und Kontextfaktoren

Die TOE-basierte Kontextfaktorenanalyse identifizierte 11 Hauptvariablen in drei Dimensionen. Die häufigsten Einflussfaktoren sind: finanzielle Ressourcen und Investitionsfähigkeit (O), regulatorische Rahmenbedingungen (E), Markt- und Nachfragesituation (E), digitale Infrastruktur und technologische Reife (T) sowie Management-Commitment und organisationales Know-how (O).

Tabelle 6: Hauptvariablen in TOE-Systematik

TOE	Hauptvariable	Häufigkeit	Wirkung
T	Digitale Infrastruktur & Datenfähigkeit	Sehr hoch	Datenverfügbarkeit (IoT, Sensorik) ist Voraussetzung für Rückverfolgung und CE-Performance-Messung
T	Technologische Reife der CE-Lösungen	Sehr hoch	Recycling-/Remanufacturing-Innovationen oft nicht in ausreichender Skalierbarkeit verfügbar
T	Zugang zu Technologien & Kosten	Hoch	KMU können technische Systeme kaum finanzieren
T	Innovationsfähigkeit & F&E-Kapazität	Mittel	Fehlende interne F&E verhindert Anpassung an CE-Anforderungen
O	Finanzielle Ressourcen & Investitionsfähigkeit	Sehr hoch	Kapitalrestriktionen als häufigste Barriere; hohe Anfangsinvestitionen
O	Management-Commitment & strategische Ausrichtung	Sehr hoch	Top Management bestimmt direkt die CE-Priorisierung
O	Ressourcen, Kompetenzen & Mitarbeiterskills	Sehr hoch	Fehlende CE-Expertise limitiert Umsetzung
O	Organisatorische Strukturen & Prozesse	Hoch	Unzureichende Prozesse (Reverse Logistics) erschweren Implementierung
E	Regulatorische Rahmenbedingungen	Sehr hoch	Gesetzliche Vorgaben als Treiber und Barriere
E	Markt- und Nachfragesituation	Sehr hoch	Kundendruck bestimmt Tragfähigkeit zirkulärer Angebote
E	Lieferketten-Integration & Netzwerke	Hoch	Kooperation entlang der WSK essenziell für KMU

Für die praktische Anwendung wurden die Kontextfaktoren in ein Assessment-Instrument mit sechs Dimensionen überführt (Digitale Reife, Finanzielle Ressourcen, CE-Kompetenz, Regulatorischer Druck, Marktnachfrage CE, Netzwerkeinbindung), jeweils auf einer dreistufigen Skala (niedrig / mittel / hoch) bewertet. Ergänzt wird das Assessment durch die Bestimmung des Projekttyps (Transformationsgrad, Fokus, Bezugseinheit).

Werkzeugkasten - Methodenfragmente

Der Werkzeugkasten enthält zehn Methodenfragmente, die bewusst alle vier im Literaturreview identifizierten Ansatztypen integrieren (Tabelle 7):

Tabelle 7: Methodenfragmente

MF1	Situationsanalyse	TOE-Assessment-Fragebogen	Situationsprofil	Discover	Typ 1
MF2	Zirkularitäts-Reifegrad	CMMI-angelehnte Skala	Reifegrad-Einordnung	Discover	Typ 1
MF3	Benchmarking	Praxisbeispiel-Datenbank	Referenzbeispiele	Discover	Typ 4
MF4	Zieldimension	Zieldimensionsanalyse	Ziele, Transf.-grad	Define	Typ 2
MF5	Produktzentr. GM-Entw.	BMC mit Recovery Modules	Zirkuläres GM (Produkt)	Develop	Typ 3
MF6	Datenzentr. GM-Entw.	Smart Circular Canvas	Datengetriebenes GM	Develop	Typ 3
MF7	KI-Ideengenerierung	Generative KI / LLMs	GM-Varianten, SWOT	Disc./Def.	Typ 3
MF8	KI-Validierung	KI-Challenges	Bewertete Konzepte	Deliver	Typ 1/3
MF9	Prototyping	KI-Mockups, Infografiken	Visuelle GM-Darst.	Develop	Typ 3

MF10	Netzwerk-/Stakeholder	WSN-Mapping, Koop.-Mod.	Kooperationsmodell	Def./Dev.	Typ 2/4
------	-----------------------	-------------------------	--------------------	-----------	---------

Legende: Typ 1 = Entscheidungs-/Bewertungsmodell | Typ 2 = Konzeptionelles Framework | Typ 3 = Anwendungsorientiertes Tool | Typ 4 = Empirisch verankert

Die Methodenfragmente MF5 (BMC mit Recovery Modules nach Braun et al.) und MF6 (Smart Circular Canvas) bilden die beiden Kern-Canvas: MF5 adressiert produktzentrierte Rückführungsstrategien und die CE-Dimensionen Ressourcen/Material und GM-Transformation; MF6 strukturiert datengetriebene Geschäftsmodelle in vier Ebenen und deckt alle vier CE-Dimensionen ab. Die KI-Fragmente MF7–MF9 wurden entlang des Double-Diamond-Modells systematisiert und setzen ein Mindestmaß an KI-Kompetenz voraus. MF10 (Netzwerk-Analyse) wurde auf Basis des Literaturreviews von einem optionalen zu einem mindestens empfohlenen Fragment aufgewertet.

Zuordnungsmatrix

Die Zuordnungsmatrix bildet das Kernstück der situativen Methodik. Vier exemplarische Situationsprofile wurden definiert (Tabelle 8):

Tabelle 8: Zuordnungsmatrix

Dimension	Profil A: Einsteiger-Produkt	Profil B: Einsteiger-Daten	Profil C: Fortgeschr.-Produkt	Profil D: Fortgeschr.-Daten
Digitale Reife	Niedrig	Mittel	Mittel	Hoch
Finanz. Ressourcen	Begrenzt	Begrenzt	Mittel	Mittel-Hoch
CE-Kompetenz	Niedrig	Niedrig	Mittel	Mittel-Hoch
Transf.-grad	Inkrementell	Inkrementell	Radikal	Radikal
Fokus	Produktzentriert	Datenzentriert	Produktzentriert	Datenzentriert

Methodenfragment	Profil A	Profil B	Profil C	Profil D
MF1: Situationsanalyse	✓ Pflicht	✓ Pflicht	✓ Pflicht	✓ Pflicht
MF2: Zirkularitäts-Reifegrad	✓ Pflicht	✓ Pflicht	✓ Pflicht	✓ Pflicht
MF3: Praxisbeispiele	✓ Empfohlen	✓ Empfohlen	○ Optional	○ Optional
MF4: Zieldimension	✓ Pflicht	✓ Pflicht	✓ Pflicht	✓ Pflicht
MF5: BMC Recovery	✓ Kernwerkzeug	○ Optional	✓ Kernwerkzeug	○ Ergänzend
MF6: Smart Circular Canvas	– Nicht empf.	✓ Kernwerkzeug	○ Ergänzend	✓ Kernwerkzeug
MF7: KI-Ideengenerierung	○ Optional	✓ Empfohlen	✓ Empfohlen	✓ Empfohlen
MF8: KI-Validierung	– Nicht empf.	○ Optional	✓ Empfohlen	✓ Empfohlen
MF9: Prototyping (KI)	– Nicht empf.	○ Optional	✓ Empfohlen	✓ Empfohlen
MF10: Netzwerk-Analyse	○ Optional	✓ Empfohlen	✓ Empfohlen	✓ Pflicht

Legende: ✓ Pflicht = in jedem Fall | ✓ Kernwerkzeug = zentrales Canvas | ✓ Empfohlen = sinnvoller Mehrwert | ○ Optional = situativ einsetzbar | – Nicht empf. = Voraussetzungen nicht erfüllt

Vorgehensmodell

Die Anwendung der Methodik folgt einem fünfstufigen Vorgehensmodell, das als iterativer Prozess konzipiert ist. Im ersten Schritt wird die unternehmensspezifische Ausgangslage erfasst, indem das TOE-Assessment (MF1) und die Bestimmung des Zirkularitäts-Reifegrades (MF2) durchgeführt sowie der Projekttyp festgelegt werden. Das Ergebnis ist ein Situationsprofil, das im zweiten Schritt mit der Zuordnungsmatrix abgeglichen wird, um die geeigneten Pflicht-, Kern- und optionalen Fragmente auszuwählen und so einen individuell konfigurierten Methodenbaukasten zusammenzustellen. Der dritte Schritt dient der Problemdefinition und Zielklärung: Mittels Zieldimensionsanalyse (MF4) und einer Inspirationsphase auf Basis von Praxisbeispielen (MF3), bei Bedarf ergänzt durch KI-gestützte Ideengenerierung (MF7), werden die konkreten Ziele und Bezugseinheiten der Transformation definiert. Im vierten Schritt erfolgt die eigentliche Geschäftsmodellentwicklung im Workshop-Format unter Anwendung des ausgewählten Kern-Canvas (MF5 oder MF6), ergänzt durch KI-Unterstützung

(MF7 bis MF9) und Netzwerk-Analyse (MF10), sofern erforderlich. Im fünften Schritt wird das entwickelte Geschäftsmodell durch KI-gestütztes Challenging (MF8), Abgleich mit Praxisbeispielen und Stakeholder-Feedback validiert. Bei Bedarf kann der Prozess zu Schritt drei oder vier zurückkehren, bis ein tragfähiges Geschäftsmodellkonzept vorliegt.

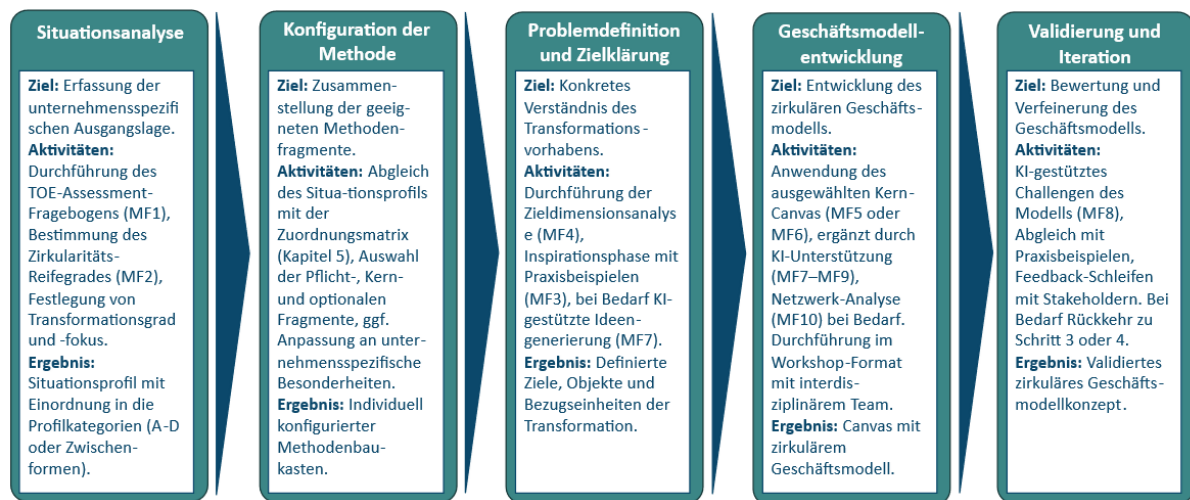


Abbildung 15: Vorgehensmodell

Die Methodik wurde iterativ in mehreren DIONA-Workshops mit KMU erprobt und am 25.11.2025 in einem abschließenden Workshop gesamthaft evaluiert. Das Feedback war insgesamt positiv: Die Teilnehmenden erkannten in dem fünfstufigen Vorgehensmodell eine zielgerichtete und nachvollziehbare Struktur. Kritisch angemerkt wurden die Komplexität bei der eigenständigen Anwendung ohne Workshopleitung sowie die begrenzte individuelle Tiefe, da die Methodik als Orientierungsrahmen wahrgenommen wurde, der unternehmensspezifische Nacharbeiten erfordert. Die Teilnehmenden empfanden daher Begleitdokumente, Videotutorials oder ein geleitetes Onlinetool. Das gewählte Abstraktionsniveau ist jedoch eine bewusste Konsequenz der heterogenen Zielgruppe und wird durch den situativen Charakter der Methodik kompensiert, der eine gezielte Anpassung der Methodenfragmente an die jeweilige Unternehmenssituation ermöglicht. Die Entwicklung umfangreicher Begleitmaterialien konnte im Projektzeitraum nicht realisiert werden und verbleibt als Handlungsfeld für zukünftige Transferaktivitäten.

Einbettung daten- und plattformbasierter Geschäftsmodelle

Die erfolgreiche Einführung einer nachhaltigen CE im unternehmerischen Kontext erfordert eine tiefgreifende und systematische Neugestaltung bestehender Geschäftsprozesse entlang der gesamten Wertschöpfungskette. Diese Transformation umfasst nicht nur technologische Anpassungen, sondern auch organisatorische, wirtschaftliche und kulturelle Veränderungen innerhalb der Unternehmen. Von zentraler Bedeutung ist dabei die Frage, welche Rolle Daten, digitale Plattformen und datenbasierte Geschäftsmodelle im Kontext kreislauffähiger Wertschöpfung einnehmen und wie sie bestehende Mechanismen und Beziehungen zwischen Akteuren innerhalb der Wertschöpfungsnetzwerke verändern.

Vor diesem Hintergrund bestand die Zielsetzung darin, die Konsortialpartner bei der Identifikation, Ergründung und Modellierung datengetriebener und kreislauffähiger Geschäftsmodelle zu unterstützen. Im Mittelpunkt standen dabei insbesondere die Analyse der Relevanz plattformbasierter Geschäftsmodelle für die Realisierung zirkulärer Wertschöpfungsstrategien sowie die Untersuchung der Rolle von Daten als zentraler Treiber und Enabler der CE. Daten werden hierbei nicht nur als technisches Nebenprodukt, sondern als eigenständige Ressource und wirtschaftliches Gut verstanden, das neue Formen der Wertschöpfung ermöglicht – etwa durch datengetriebene Dienstleistungen, Produktnutzungsoptimierung oder transparente Rückverfolgbarkeit von Material- und Informationsflüssen.

Zur Erreichung dieser Zielsetzung wurde während der Laufzeit des APs, von Oktober 2023 bis Dezember 2025, ein mehrstufiges methodisches Vorgehen umgesetzt. Dieses umfasste eine strukturierte Literaturanalyse zur systematischen Erfassung des aktuellen Forschungs- und

Technologiestands sowie die Durchführung und Auswertung von Experteninterviews mit Vertretern aus Wissenschaft, Industrie und Normung. Auf dieser Grundlage konnte ein fundiertes Verständnis der Implikationen von Daten und Plattformen für eine nachhaltige und resiliente CE entwickelt werden. Die gewonnenen Erkenntnisse bilden eine fundierte Basis für die Entwicklung neuer Geschäftsmodelle, Werkzeuge und Handlungsempfehlungen, die Unternehmen bei der strategischen Transformation hin zu einer datenbasierten und ressourcenschonenden CE unterstützen.

Datenbasierte Geschäftsmodelle

Tabelle 9 gibt einen Überblick über die identifizierten daten- und plattformbasierten Geschäftsmodelle in der CE. Es ist erkennbar, dass datengetriebene Geschäftsmodelle die Erfassung, Analyse und Auswertung von großen Datenmengen nutzen, um neue Wertversprechen zu schaffen und Prozesse zu optimieren. Hierbei ist insbesondere ein Paradigmenwechsel vom Produktverkauf zum Verkauf der Funktion oder der Nutzung in Form von Product-as-a-Service (PaaS) und Pay-per-Use Systeme beobachtbar. Mit der Hilfe von IoT-Sensoren und digitalen Schnittstellen werden Echtzeitdaten über den Produktzustand, die Nutzungsintensität und den Verschleiß erfasst. Diese Daten sind essenziell für die vorausschauende Wartung (Predictive Maintenance) und Reparatur, wodurch die Lebensdauer der Produkte maximiert wird. Das Unternehmen behält das Eigentum, was die Rücknahme am Ende der Nutzungsdauer für Reparatur oder Recycling erleichtert.

Weitere datenbasierte Geschäftsmodelle zielen auf die intelligente Bestandsführung und gesteigerte Materialeffizienz ab. Durch den Einsatz von KI können Unternehmen ihre Produktions- und Logistikprozesse auf Basis von Echtzeitdaten und Prognosen deutlich optimieren. Dies betrifft beispielsweise KI-basierte Prognosen für den Energieverbrauch oder die Steuerung von Lieferketten, um unnötige Lagerbestände zu vermeiden.

Darüber hinaus rückt das optimierte Recycling und die Ressourceneffizienz in den Vordergrund von kreislauffähigen Geschäftsmodellen. Innerhalb des Recyclingprozesses spielen Daten eine immer wichtigere Rolle. Sie dienen zum Beispiel als Grundlage für KI-Systeme, welche mithilfe von Bilderkennungsalgorithmen und Sensordaten die Sortierqualität und -geschwindigkeit von Abfallströmen erheblich verbessern können. Dies ermöglicht eine hochwertigere Ressourcenrückgewinnung.

Der Digitale Produktpass, welcher in den nächsten Jahren in der EU schrittweise eingeführt wird, ist ein zentrales Beispiel für die Synergie von Daten- und Plattformsätzen. Der DPP wird eine standardisierte, digitale Plattform sein, auf der lebenszyklusrelevante Daten (Materialien, Reparierbarkeit, Entsorgung) zu Produkten gespeichert werden. Diese datenbasierte Transparenz ist die Grundlage für alle nachgeschalteten zirkulären Geschäftsmodelle (Reparatur, Wiederverwendung, Recycling) und stellt somit einen elementaren Baustein der digitalen CE dar.

Plattformbasierte Geschäftsmodelle

Plattformbasierte Geschäftsmodelle nutzen digitale Ökosysteme und mehrseitige Märkte, um Akteure zu vernetzen und den Austausch von Ressourcen, Produkten oder Dienstleistungen zu organisieren. Dabei entstehen zum Beispiel digitale Marktplätze für Sekundärrohstoffe. Solche Plattformen dienen als Vermittler zwischen Unternehmen, die Abfälle oder Nebenprodukte anbieten und solchen, die diese als Sekundärrohstoffe wiederverwenden können. Die Plattform überwindet regionale und informationelle Barrieren, indem sie Transparenz über verfügbare Mengen und Qualitäten schafft und so die Schließung industrieller Kreisläufe fördert.

Darüber hinaus kommt dem der Collaborative Consumption eine bedeutende Rolle zu. Hierbei orchestrieren Plattformen die gemeinsame Nutzung von physischen Gütern (z. B. Fahrzeuge, Werkzeuge, Kleidung) zwischen Nutzern, wodurch die Auslastung und damit die Lebensdauer der Produkte erhöht wird. Die Plattform stellt die Infrastruktur für die Vermittlung, Abrechnung und oft auch die Logistik bereit.

Zusammenfassung

Langfristig tragen die im AP erzielten Ergebnisse dazu bei, den Wissenstransfer zwischen Forschung und Praxis zu fördern, Innovationspotenziale daten- und plattformbasierter Ansätze im Kontext der CE sichtbar zu machen und konkrete Anwendungsfelder für datengetriebene Plattformlösungen in industriellen Wertschöpfungsnetzwerken zu identifizieren. Damit leisten die Ergebnisse einen wesentlichen Beitrag zur wissenschaftlichen Fundierung und praktischen Umsetzung von

datenbasierten Transformationsstrategien auf dem Weg zu einer nachhaltigen und zukunftsfähigen Wirtschaft.

Tabelle 9. Übersicht über daten- und plattformbasierte Geschäftsmodelle in der Kreislaufwirtschaft

Typ	Geschäftsmodell	Kreislaufstrategie	Funktionsweise und Rolle von Daten/Plattform	Beispiele und Anwendungsfälle
Datenbasiert	Product-as-a-Service (PaaS) / Pay-per-Use	Slow (Verlängerung der Lebensdauer) & Loop (Rückführung)	IoT-Daten (Nutzung, Zustand, Verschleiß) ermöglichen bedarfsgerechte Wartung/Reparatur, garantieren die Funktionalität und erleichtern die Rücknahme.	Vermietung von Maschinen/Geräten (z.B. Beleuchtung, Werkzeuge), Abrechnung nach Nutzung (z.B. Stunden, Output) statt Kauf.
	Optimiertes Recycling / Ressourceneffizienz	Close (Kreisläufe schließen)	Einsatz von Künstlicher Intelligenz (KI) zur Sortieroptimierung in Recyclinganlagen, basierend auf Bilderkennung und Materialdaten. Daten über Zusammensetzung von Altmaterialien erleichtern die Rückgewinnung.	KI-gestützte Sortieranlagen für Kunststoff- oder Elektronikschrott, Rückgewinnung von Rohstoffen aus E-Auto-Batterien.
	Digitaler Produktpass (DPP)	Loop (Rückführung & Wiederverwendung)	Standardisierte Schnittstelle zur Speicherung und Weitergabe von Produktinformationen (Materialzusammensetzung, Reparierbarkeit, Herkunft) über den gesamten Lebenszyklus. Daten sind die Grundlage für Reparatur, Wiederverwendung und hochwertiges Recycling.	Digitale Bereitstellung von Informationen für Reparaturbetriebe, Sortieranlagen und Endnutzer, um die Zirkularität von Produkten zu verbessern.
	Intelligente Bestandsführung / Materialeffizienz	Narrow (Ressourcenverbrauch minimieren)	KI-basierte Einspeise-/Lastflussprognosen oder Produktionsplanungen nutzen große Datenmengen zur Optimierung von Prozessen, Minimierung von Ausschuss und Energieverbrauch.	KI-Optimierung des Stromverbrauchs in der Produktion (z.B. Solandeo, GridSage), Vorausschauende Wartung (Predictive Maintenance) zur Vermeidung von Ausfällen und Ersatzteilbedarf.
Plattformbasiert	Digitale Marktplätze für Sekundärrohstoffe	Close (Kreisläufe schließen)	Plattform bringt Anbieter (z.B. Abfallwirtschaft, produzierendes Gewerbe) und Nachfrager (z.B. Recyclingunternehmen, Produzenten) von Abfällen, Reststoffen und Sekundärrohstoffen zusammen.	Handelsplattformen für Kunststoffrezyklate, Bau- und Abbruchabfälle oder industrielle Nebenprodukte (Industrielle Symbiose).
	Sharing & Collaborative Consumption	Slow (Nutzungsintensität erhöhen)	Plattformen organisieren, koordinieren und vermitteln die gemeinsame oder	Car-Sharing-Dienste, Verleihplattformen für

			sequenzielle Nutzung von Produkten (B2C) oder Produktionsmitteln (B2B).	Werkzeuge/Kleidung, gemeinsame Nutzung von Logistik-Kapazitäten.
--	--	--	---	--

3.3 Durchgängige Informationsbereitstellung

Eine durchgängige Informationsbereitstellung ist eine zentrale Voraussetzung für die erfolgreiche Umsetzung von CE. Nur wenn Informationen über Produkte, Materialien und Prozesse zugänglich und verknüpfbar bereitgestellt werden, können Unternehmen digitale Technologien wirksam einsetzen und geschlossene Stoffkreisläufe realisieren. In diesem Kapitel werden daher unterschiedliche Forschungsergebnisse zusammengeführt, die gemeinsam aufzeigen, wie Informationsflüsse in der CE gestaltet und genutzt werden können. Im Rahmen des APs 1.3 lag die Zielsetzung vom ISST in der Untersuchung verschiedener Aspekte an der Schnittstelle zwischen CE und Digitalisierung, während das IIM sich auf digitale Technologien, insbesondere auf Metaverse fokussierte und ein Entscheidungsmodell zur Technologieauswahl entwickelte. Die WI befasste sich mit der Konzeption von Geschäftsprozessen, der unterliegenden digitalen Infrastruktur sowie der Integration digitaler Technologien in die Geschäftsprozesse mit dem Ziel der zirkulären Wertschöpfung.

3.3.1 Technologieradar für eine durchgängige Digitalisierung

Datenökosysteme in der Kreislaufwirtschaft

Im Unterarbeitspaket 1.3.1 wurde im Zeitraum von Oktober 2022 bis September 2023 eine Fähigkeitsanalyse bestehender Datenteilungsinitiativen, wie etwa der International Data Spaces oder des Mobility Data Spaces, durchgeführt. Neben der Identifikation von Best Practices stand dabei insbesondere die Rolle von Data Spaces in Bezug auf nachhaltige Wertschöpfung und CE sowie deren Integration in ein Industrial Metaverse im Fokus. Hierbei ist eine Reihe von verschiedenen Ergebnissen erzielt worden. Es sind Anforderungen und Funktionalitäten erfasst worden, welche die Data Spaces aufweisen müssen (Tabelle 10). Die Ergebnisse und Erkenntnisse aus diesem Prozess wurden in einem Konferenzpaper zusammengefasst und veröffentlicht. Es ist eine Referenzarchitektur entwickelt worden, welche die Integration von Data Spaces in einem Industrial Metaverse abbildet. Auf Basis dieser Referenzarchitektur und einer Literaturanalyse, wurden Best Practices identifiziert und konkrete Anforderungen für Data Spaces im Industrial Metaverse abgeleitet (Tabelle 10). Dabei konnten Schlüsselaspekte herausgearbeitet werden, die die Integration von Nachhaltigkeitskriterien in Datenteilungsinitiativen ermöglichen und fördern. Die Ergebnisse leisten einen wissenschaftlichen Beitrag und unterstützen die Weiterentwicklung und Implementierung zukünftiger Data Spaces unter besonderer Berücksichtigung von Nachhaltigkeitsaspekten.

Potenziale von Data Spaces in Bezug auf die Nachhaltigkeit und Kreislaufwirtschaft

Ecological	Environment	Food	Plants	Energy
	- Air pollution tracking - Water quality optimization - Soil quality tracking	- Improving Food supply chain - Improved access to food - Tracking food quality - Optimizing food quality	Optimizing plant growth	- Analyze wind power systems - Optimizing water power - Reduce waste of energy - Monitor energy consumption - Optimizing wind power to produce hydrogen
	Emission	Animals	Waste	
	- Emission monitoring - CO₂ optimization - Emission comparison between companies - Reducing CO₂ emissions in production - CO₂ transparency	Monitoring animal health	- Circular waste - Smart waste	
Economic	Mobility	Reporting	Supply Chain	Manufacturing
	- Seamless mobility - Optimizing traffic routes - Live hazard alters - Traffic flow management - Automated speed monitoring - Connected mobility	- Sustainability ratings - SDG-Monitoring - Credibility and Compliance through transparency - Business Partner Data Management	- Due Diligence in supply chains - Supply chain tracking - Resilient supply chain - Predictive risk management in supply chains - Sharing of sensor data for transparency of ships - Digitalization of fresh produce logistics - Identification of delays in the supply chain	- Life cycle management - Optimization of production - Industrial quality platform for Material - Traceability for circular economy - Marketplace for recycled products - Early warning system for quality defects - Optimization of product quality - Automatic product inspection - Optimization of production sequence - Sharing transactional data - Maintenance forecast - Data sharing in production - Marketplace for manufacturing data - Warehouse automation - Shared production - Intelligent maintenance of machines
	Tourism	Finance		
	- Seamless travel - Analyzing tourism data - Building tourism value chains	Financial fraud detection		
Social	Health	Education		
	- Individual care plans - Personal healthcare services - Secondary use of health data - Self-determined everyday health - Clinical Accompaniment - Share rare disease data	Free sharing of education data		

Abbildung 16: Übersicht über die Potenziale von Data Spaces in Bezug auf die Nachhaltigkeit und Kreislaufwirtschaft

Die erstellte Karte beschreibt die identifizierten Dimensionen und Potenziale von Data Spaces im Kontext der Nachhaltigkeit. Sie umfasst 15 Dimensionen, die aus einer systematischen

Literaturrecherche abgeleitet wurden. Auf der untersten Ebene bildet die Karte 65 spezifische Potenziale von Data Spaces ab, die einen Beitrag zur Förderung der Nachhaltigkeit leisten. In Anlehnung an die Empfehlungen der Literatur und zur besseren Strukturierung der Potenziale wurden die Erkenntnisse in Meta-Dimensionen unterteilt. Dabei wurden die drei Säulen der Nachhaltigkeit – Ökologie, Ökonomie und Soziales – als Meta-Dimensionen gewählt.

Meta-Dimension: Ökologische Nachhaltigkeit

Die erste Metadimension fasst Dimensionen zusammen, die für die ökologischen Potenziale von Data Spaces relevant sind. Als erste Beobachtung kann festgehalten werden, dass die Dimensionen Beispiele aus verschiedenen Bereichen wie Emissionen, Umwelt und Energie enthalten. Darüber hinaus decken die spezifischen Potenziale ein breites Spektrum ab, das von der Verfolgung der Luftverschmutzung, über den Vergleich von Emissionen zwischen Unternehmen oder die Optimierung von Wasserkraftanlagen reicht. Dabei sind die am häufigsten verwendeten SDGs in der Metadimension Kein-Hunger (SDG 2) sowie Maßnahmen zur Klimapolitik (SDG 13). Insgesamt macht die Anzahl der Potenziale in dieser Metadimension 32 % der insgesamt beobachteten Potenziale aus, was auf ein großes Interesse an dieser Säule der Nachhaltigkeit schließen lässt. Ein möglicher Grund für das hohe Interesse könnte in den Vorgaben des Gesetzgebers begründet sein, der verschiedene Gesetze zur ökologischen Nachhaltigkeit von Unternehmen in der EU erlassen hat. So wird zum Beispiel die europäische Richtlinie zur Nachhaltigkeitsprüfung von Unternehmen (CSDDD) als ein führendes Gesetz angesehen, das umfassende Regeln für in der EU tätige Unternehmen zur Achtung der Menschenrechte und der Umwelt im Rahmen ihrer Geschäftstätigkeit definiert.

Meta-Dimension: Wirtschaftliche Nachhaltigkeit

In der zweiten Metadimension sind Potenziale von Data Spaces im Kontext von Nachhaltigkeitszwecken in der Wirtschaft abgebildet. Als erste Beobachtung kann festgehalten werden, dass die meisten Potenziale in der vorhandenen Stichprobe dieser Metadimension zugeordnet werden können (58 %). Es ist davon auszugehen, dass die meisten Potenziale hier verortet sind, da die Unternehmen in der Stichprobe der Meinung sind, dass Nachhaltigkeit aus wirtschaftlicher Sicht die unmittelbarsten Auswirkungen auf ihr Tagesgeschäft hat. Ähnlich wie bei der ökologischen Metadimension lässt sich auch hier eine große Bandbreite an konkreten Dimensionen und Potenzialen beobachten. So sind beispielsweise die Bereiche Mobilität und Produktion, sowie Lieferketten mit einer Vielzahl spezifischer Potenziale vorhanden. Exemplarisch können Anwendungsfälle wie die Optimierung von Verkehrswegen, die Rückverfolgbarkeit von Materialien oder das vorausschauende Risikomanagement in Lieferketten genannt werden. Eine weitere Beobachtung zeigt, dass die meisten Potenziale innerhalb der Metadimension Wirtschaft in der Dimension Produktion angesiedelt sind. Aufgrund dieser Erkenntnisse ist davon auszugehen, dass in der Praxis ein großes Interesse an der Schaffung von Data Spaces für das produzierende Gewerbe besteht. Da die Mehrzahl der in dieser Studie untersuchten Data Spaces in Europa angesiedelt ist, wo der Sektor der industriellen Fertigung von großer Wichtigkeit ist, kann davon ausgegangen werden, dass in diesem Bereich genügend Fördermittel zur Verfügung gestellt werden können, um Forschungs- und Industrieprojekte im Bereich von Data Spaces durchzuführen. Darüber hinaus gibt es Gesetze, wie das deutsche Gesetz zur Sorgfaltspflicht in der Lieferkette, die eine nachhaltige Produktions- und Lieferkette unter Berücksichtigung verschiedener Nachhaltigkeitsaspekte fordern. Die in dieser Metadimension am meisten angesprochenen SDGs sind menschenwürdige Arbeit und Wirtschaftswachstum (SDG 8), Industrie, Innovation und Infrastruktur (SDG 9) sowie nachhaltiger Konsum und Produktion (SDG 12).

Meta-Dimension: Soziale Nachhaltigkeit

Die dritte Metadimension befasst sich mit den sozialen Potenzialen von Data Spaces in Bezug auf die Nachhaltigkeit. Im Vergleich zu den anderen Metadimensionen kann festgestellt werden, dass deutlich weniger Potenziale (10 %) in dieser Metadimension verortet sind. Es wird davon ausgegangen, dass die Metadimension im Vergleich zu den anderen kleiner ist, da der soziale Sektor über weniger finanzielle Ressourcen verfügt, um Data Spaces zu entwickeln und zu betreiben. Die Metadimension selbst ist unterteilt in die Dimensionen Gesundheit und Bildung. Während in der Dimension Gesundheit verschiedene Potenziale, wie individuelle Versorgungspläne und die gemeinsame Nutzung von Daten über seltene Krankheiten vorhanden sind, gibt es in der Stichprobe nur das Potenzial des freien Austauschs von Bildungsdaten, welches in der Dimension der Bildung verortet ist. Das am häufigsten genannte SDG in der sozialen Metadimension war Gesundheit und Wohlbefinden (SDG 3).

Dieses Teilergebnis bildet eine Karte ab, um Nachhaltigkeitspotenziale von Data Spaces zu sammeln, zu gruppieren und zu organisieren. Aus den Erkenntnissen der Karte lassen sich mehrere Implikationen für Wissenschaft und Praxis ableiten. In Bezug auf die Wissenschaft, erweitert die Studie das Wissen über Data Spaces im Kontext der nachhaltigen Entwicklung. Die entwickelte Karte zeigt stellt ein großes Bild der Nachhaltigkeitslandschaft, welche durch Data Spaces ermöglicht wird, dar bildet eines der wichtigsten sowie zukunftsweisenden Forschungsfeldern für die industrielle Wertschöpfung und die Gesellschaft im 21. Jahrhundert ab. Die Ergebnisse haben darüber hinaus auch Auswirkungen auf die Praxis. Wie bereits erwähnt, verpflichten verschiedene Vorschriften, wie das Gesetz zur Sorgfaltspflicht in der Lieferkette, Unternehmen dazu, im Hinblick auf die drei Säulen der Nachhaltigkeit zu handeln. Dies erfordert einen sicheren und unternehmensübergreifenden Datenaustausch. Infolgedessen benötigt die Industrie Kenntnisse über die Potenziale von Data Spaces im Zusammenhang mit der Nachhaltigkeit, um ihre strategischen Entscheidungen für eine nachhaltigere Wertschöpfung zu unterstützen.

Anforderungen für Data Spaces im Industrial Metaverse:

In der modernen Industrie bilden Daten das Fundament der digitalen Transformation. Im Kontext des Industrial Metaverse stellen Data Spaces eine innovative Plattform für den sicheren, interoperablen und effizienten Austausch von Daten zwischen unterschiedlichen Akteuren und Systemen dar. Das Konzept des Industrial Metaverse beschreibt eine erweiterte digitale Umgebung, in der physische und virtuelle Welten miteinander verknüpft werden. Dadurch erhalten Unternehmen die Möglichkeit, ihre Produktionsprozesse, Lieferketten und Geschäftsmodelle mithilfe von Daten und Digitalen Zwillingen gezielt zu optimieren. Data Spaces fungieren in diesem Zusammenhang als vertrauenswürdige Dateninfrastruktur, die den sicheren Austausch und die gemeinsame Nutzung von Daten ermöglicht, ohne dass die Datenhoheit der Eigentümer beeinträchtigt wird. Sie gewährleisten, dass Daten unter Einhaltung rechtlicher und regulatorischer Anforderungen geteilt werden können und gleichzeitig die Interoperabilität zwischen verschiedenen Systemen und Plattformen sichergestellt ist. Die Integration moderner Technologien, wie des Internets der Dinge, KI, Blockchain und Cloud-Computing, in Data Spaces innerhalb des Industrial Metaverse bietet vielfältige Vorteile. Dazu zählen eine gesteigerte Effizienz, eine erhöhte Innovationsfähigkeit sowie eine größere betriebliche Flexibilität. Durch den Echtzeitzugriff auf Daten, deren Analyse und die darauf basierte Entscheidungsfindung können Unternehmen ihre Betriebsabläufe optimieren und neue Geschäftspotenziale erschließen. Abbildung 17 zeigt eine exemplarische Referenzarchitektur für die Integration von Data Spaces in ein Industrial Metaverse mit verschiedenen Schichten.

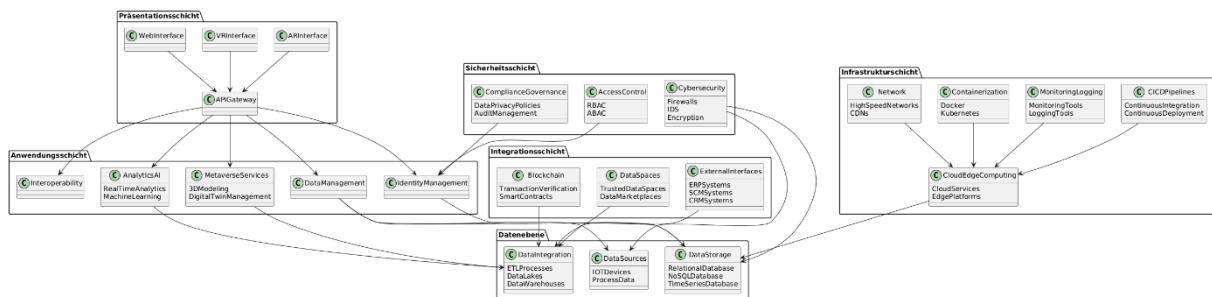


Abbildung 17: Referenzarchitektur für Data Spaces im Industrial Metaverse

Tabelle 10 stellt die im Rahmen des APs entwickelten Anforderungen für Data Spaces im Industrial Metaverse dar.

Tabelle 10: Anforderungen für Data Spaces im Industrial Metaverse

Kategorie	Funktionale Anforderungen	Nichtfunktionale Anforderungen
Datenmanagement	- Verwaltung großer Datenmengen - Sicherstellung der Datenqualität und -konsistenz - Echtzeit-Datenverarbeitung und -analyse	- Hohe Datenverfügbarkeit - Skalierbarkeit der Datenverarbeitung - Zuverlässigkeit der Datenintegrität
Interoperabilität	Nahtlose Integration mit bestehenden Systemen	Standardkonformität der Schnittstellen

	• Unterstützung für verschiedene Datenformate und Protokolle • Integration von IoT-Geräten und -Sensoren	• Flexibilität bei der Integration • Robustheit gegen Datenformatänderungen
Sicherheit	• Gewährleistung der Datensicherheit und -integrität • Schutz vor Cyberangriffen • Einhaltung von Datenschutzbestimmungen	• Hohe Verschlüsselungsstandards • Minimale Latenz bei Sicherheitsüberprüfungen • Regelmäßige Sicherheitsupdates
Identitätsmanagement	• Sichere Authentifizierung und Autorisierung • Single Sign-On (SSO) • - Verwaltung von Nutzerrollen und -rechten	• Hohe Verfügbarkeit der IAM-Dienste • Schnelle Reaktionszeiten bei Authentifizierungen • Benutzerfreundlichkeit der IAM-Schnittstellen
Datenanalyse und KI	• Unterstützung für fortgeschrittene Datenanalyse und Machine Learning • Echtzeitanalyse von Datenströmen • Erstellung und Verwaltung von Digital Twins	• Hohe Performanz bei Datenanalysen • Skalierbarkeit der KI-Modelle • - Geringe Latenzzeiten bei Echtzeitanalysen
Metaverse-Dienste	• Erstellung und Verwaltung von 3D-Modellen und Simulationen • Unterstützung für VR und AR • Integration mit Digitalen Zwillingen	• Hohe Grafikqualität bei VR/AR • Realistische Simulationen • - Geringe Latenzzeiten bei VR/AR-Interaktionen
Compliance	• Einhaltung von gesetzlichen und regulatorischen Anforderungen • Transparente und nachvollziehbare Datenverarbeitung • Regelmäßige Audits und Überprüfungen	• Hohe Auditierbarkeit • Einhaltung von Compliance-Richtlinien • Transparenz der Datenverarbeitung
Infrastruktur	• Skalierbare und flexible Cloud-Infrastruktur • Unterstützung für Edge-Computing • Kontinuierliche Überwachung und Verwaltung der Infrastruktur	• Hohe Verfügbarkeit der Infrastruktur • Skalierbarkeit der Ressourcen • Effiziente Ressourcennutzung
Netzwerk	• Hochgeschwindigkeitsnetzwerke für schnelle Datenübertragung • Zuverlässige und sichere Kommunikationskanäle • Unterstützung für moderne Netzwerktechnologien	• Hohe Netzverfügbarkeit • Geringe Netzwerklatenz • Zuverlässigkeit der Kommunikationskanäle
Monitoring und Logging	• Echtzeitüberwachung der Systeme und Datenströme • Protokollierung aller Aktivitäten • Frühzeitige Erkennung und Behebung von Problemen	• Hohe Performanz der Monitoring-Tools • Zuverlässigkeit der Protokollierung • Schnelle Reaktionszeiten bei Fehlererkennung

3.3.2 Digital Twin basiertes Industrial Metaverse

Im Unterarbeitspaket 1.3.2 hat das Fraunhofer ISST im Zeitraum von Oktober 2023 bis September 2024 auf Basis der entwickelten Referenzarchitektur sowie der daraus abgeleiteten Anforderungen Designprinzipien formuliert. Hierzu wurde ein Design-Science-Research-Ansatz angewendet, um systematisch Gestaltungsprinzipien für die Integration von Data Spaces im Industrial Metaverse zu entwickeln. Die resultierenden Designprinzipien dienen sowohl der Wissenschaft als auch der Praxis als Orientierung und können als Rahmenwerk genutzt werden, um die Implementierung und Integration von Data Spaces in Industrial-Metaverse-Umgebungen gezielt zu unterstützen.

Tabelle 11: Designprinzipien für Data Spaces im Industrial Metaverse

Modularität	Die Architektur sollte modular aufgebaut sein, um Flexibilität und Anpassungsfähigkeit zu gewährleisten. Einzelne Komponenten sollten unabhängig voneinander entwickelt, getestet und ausgetauscht werden können.
Interoperabilität	Die Architektur muss die nahtlose Integration verschiedener Systeme und Datenquellen unterstützen. Standardisierte Schnittstellen und Protokolle sollten verwendet werden, um die Zusammenarbeit zwischen unterschiedlichen Plattformen zu erleichtern.
Skalierbarkeit	Die Lösung sollte skalierbar sein, um mit wachsendem Datenvolumen und zunehmender Komplexität der Anwendungen Schritt halten zu können. Dies betrifft sowohl die Datenverarbeitung als auch die Speicherressourcen.
Sicherheit	Sicherheitsmaßnahmen wie Datenverschlüsselung, Zugriffskontrollen und Intrusion Detection Systems (IDS) müssen in die Architektur integriert werden, um den Schutz der Daten und Systeme zu gewährleisten.
Datenintegrität	Mechanismen zur Sicherstellung der Datenintegrität und -konsistenz müssen implementiert werden, um die Verlässlichkeit und Genauigkeit der Daten zu gewährleisten.
Datenqualität	Die Architektur sollte Funktionen zur Überprüfung und Sicherstellung der Datenqualität beinhalten, um fehlerhafte oder unvollständige Daten zu identifizieren und zu bereinigen.
Echtzeitfähigkeit	Systeme und Anwendungen sollten in der Lage sein, Daten in Echtzeit zu verarbeiten und zu analysieren, um sofortige Einblicke und Entscheidungen zu ermöglichen.
Benutzerfreundlichkeit	Die Benutzeroberflächen sollten intuitiv und benutzerfreundlich gestaltet sein, um eine einfache Nutzung und Interaktion zu ermöglichen und die Akzeptanz bei den Anwendern zu erhöhen.
Flexibilität	Die Architektur sollte flexibel genug sein, um sich an sich ändernde Geschäftsanforderungen und technologische Entwicklungen anpassen zu können.
Nachhaltigkeit	Die Architektur sollte energieeffizient und ressourcenschonend gestaltet sein, um einen nachhaltigen Betrieb zu gewährleisten.
Compliance	Die Architektur muss sicherstellen, dass alle gesetzlichen und regulatorischen Anforderungen (z.B. GDPR) eingehalten werden, um rechtliche Risiken zu minimieren.
Transparenz	Die Datenverarbeitung und -analyse sollten transparent und nachvollziehbar gestaltet sein, um das Vertrauen der Stakeholder zu gewinnen und zu erhalten.
Wiederverwendbarkeit	Komponenten und Services sollten wiederverwendbar gestaltet sein, um Entwicklungsaufwand und -kosten zu reduzieren und die Effizienz zu steigern.
Fehlertoleranz	Die Architektur sollte robust und fehlertolerant sein, um auch bei Ausfällen oder Störungen den kontinuierlichen Betrieb sicherzustellen.

Innovation	Die Architektur sollte die Integration neuer Technologien und Innovationen unterstützen, um kontinuierliche Verbesserungen und Wettbewerbsvorteile zu ermöglichen.
------------	--

Entscheidungsmodell für die durchgehende Digitalisierung

Sowohl Data Spaces als auch das Industrial Metaverse stellen zentrale Bausteine für eine digital unterstützte CE dar. Ihre Potenziale können jedoch nur durch eine klare Governance-Struktur und eine gesicherte Datensouveränität vollständig ausgeschöpft werden. Im Rahmen des Unterarbeitspakets 1.3.3 wurden im Zeitraum von Oktober 2024 bis zum Projektende im Dezember 2025 verschiedene Governance- und Souveränitätsaspekte identifiziert und in die bestehenden Vorarbeiten zu Data Spaces und dem Industrial Metaverse integriert. Tabelle 12 zeigt einen Auszug der wesentlichen Governance- und Souveränitätsaspekte im Kontext der CE.

Tabelle 12: Übersicht über Governance- und Souveränitätsaspekte

Aspekt	Data Spaces	Industrial Metaverse	Bedeutung für die Kreislaufwirtschaft
Datensouveränität	Datenanbieter behalten die volle Kontrolle über ihre Daten. Nutzungsbedingungen (Policies) werden direkt mit Datennutzung verknüpft.	Wird durch die Anbindung an Data Spaces sichergestellt. Die Souveränität betrifft hier vor allem die Hoheit über den Digitalen Zwilling (z.B. Fabrik, Produkt).	Garantiert, dass Unternehmen sensible Daten in Wertschöpfungskreisläufen teilen können, ohne die Kontrolle zu verlieren. Fundament für Vertrauen und Kooperation.
Governance-Struktur	Gemeinschaftliche, konsensbasierte Regelwerke (z.B. IDSA Rule Book, Code of Conduct) regeln den Datenzugriff, -nutzung und die Interoperabilität.	Rollen- und Rechtenkonzepte müssen definiert werden: Wer darf welche virtuellen Aktionen im digitalen Abbild durchführen oder dessen Daten einsehen?	Regelt die Zusammenarbeit in zirkulären Ökosystemen (z.B. wer darf die Reparaturanleitung im DPP ergänzen, wer darf die Nutzungsdaten für PaaS verwenden?).
Interoperabilität & Standards	Gewährleistung durch gemeinsame Semantiken, Referenzarchitekturen und technische Konnektoren (z.B. basierend auf Gaia-X-Prinzipien).	Erfordert standardisierte Datenformate.	Ermöglicht den durchgängigen Informationsfluss (z.B. vom Hersteller über den Nutzer bis zum Recycler) und die Verknüpfung von physischen und virtuellen Assets.
Vertrauensbasis	Aufbau durch sichere Identitätskonzepte (Authentifizierung) und Zertifizierung von Teilnehmern und Komponenten (z.B. Connectors).	Vertrauen in die Echtheit und Aktualität der im Metaverse gespiegelten Realität (Digitaler Zwilling).	Stellt sicher, dass Partner in der zirkulären Lieferkette auf zuverlässige und unverfälschte Produktdaten zugreifen.
Compliance	Ausrichtung an EU-Regularien wie Data Governance Act, Data Act und der Ökodesign-Verordnung.	Regulatorische Klärung, welche Regeln in das Industrial Metaverse	Erzwingt die Bereitstellung zirkulärer Daten (z.B. Digitaler Produktpass (DPP)) und regelt die faire Entschädigung für die Datenteilung.

		übertragen werden müssen.	
--	--	---------------------------	--

3.3.3 Entscheidungsmodell zur Technologieauswahl

Ein Entscheidungsmodell zur Technologieauswahl ist in der CE von zentraler Bedeutung, da digitale Technologien als essenzieller Befähiger zur Adaption von CE-Prinzipien gesehen wird (Sharma et al. 2023) (Sharma et al. 2023), es Unternehmen allerdings häufig an Kenntnissen über digitale Technologien mangelt (Appelfeller und Feldmann 2023). Vor diesem Hintergrund wurde im Rahmen von DIONA ein Entscheidungsmodell entwickelt, das Unternehmen bei der systematischen Auswahl geeigneter Technologien für die CE unterstützt. Insbesondere das Metaverse wurde dabei als neuartige Technologie untersucht.

Ergänzend dazu ordnete zuvor ein Technologieradar digitale Technologien hinsichtlich ihres Beitrags zu ökonomischen, ökologischen und sozialen Nachhaltigkeitszielen ein. Damit schafft es eine thematische Grundlage für das Entscheidungsmodell. Eine durchgeführte Studie untersuchte daher mittels einer strukturierten Literaturanalyse den Einsatz von Technologien, um die Nachhaltigkeit entlang der Lieferkette zu verbessern. Schwerpunkte der Studie lagen auf der Identifizierung von Technologien und der Adressierung der Nachhaltigkeitsdimensionen.

In einigen wenigen Artikeln wurden mehrere digitale Technologien aufgeführt, so dass die Summe der Prozentsätze 100 % übersteigt (siehe Abbildung 18). Digitale Technologien wirken sich nicht in jedem Anwendungsfall direkt auf die Nachhaltigkeit der Lieferkette aus, sondern unterstützen Unternehmen dabei, entlang der Lieferkette nachhaltig zu sein. Digitale Plattformen können Unternehmen und Lieferketten dabei unterstützen, nachhaltigkeitsorientierte Wertschöpfung zu fördern. Blockchain kann darüber hinaus direkt zur Nachhaltigkeit beitragen, indem sie Transparenz und Vertrauen innerhalb der Lieferkette stärkt.

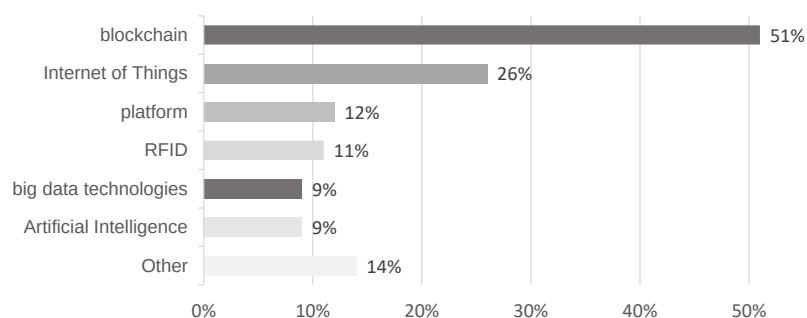


Abbildung 18: Digitale Technologien für nachhaltige Lieferketten

Die Analyse zeigt, dass 51 % der Artikel in der Stichprobe Blockchain zur Unterstützung nachhaltiger Lieferketten nutzen. Andere relevante digitale Technologien sind das Internet der Dinge (26 %), Plattformen (12 %), Radiofrequenz-Identifikation (RFID) (11 %), Big-Data-Technologien (9 %) und künstliche Intelligenz (9 %). Die Kategorie "Sonstige" (14 %) fasst weitere digitale Technologien zusammen, die entweder selten genannt oder teilweise kundenspezifisch erstellt wurden. Dazu gehören z. B. Cloud Computing, Simulation oder vom Kunden entwickelte digitale Trainingssysteme.

Das zweite Ergebnis der Studie ist ein Technologieradar, das die Adressierung der Technologieeinsätze in Bezug zu den drei Nachhaltigkeitsdimensionen Ökonomie, Ökologie und Soziales visualisiert (Abbildung 19). Die Studie zeigt, dass digitale Technologien in Lieferketten nicht nur ökologische und ökonomische, sondern auch soziale Nachhaltigkeitsaspekte unterstützen können, etwa durch bessere Arbeitsbedingungen oder eine stärkere Vernetzung der beteiligten Akteure. Blockchain nimmt dabei eine besondere Rolle ein, da sie Vertrauen und Transparenz innerhalb der Lieferkette fördern kann. Der Einsatz von KI wird im Kontext nachhaltiger Lieferketten bislang vergleichsweise wenig betrachtet, obwohl KI in vielen Bereichen großes Potenzial besitzt und auch Bestandteil anderer digitaler Technologien sein kann. Daher besteht weiterer Forschungsbedarf, um den Beitrag von KI zu nachhaltigen Lieferketten genauer zu untersuchen.

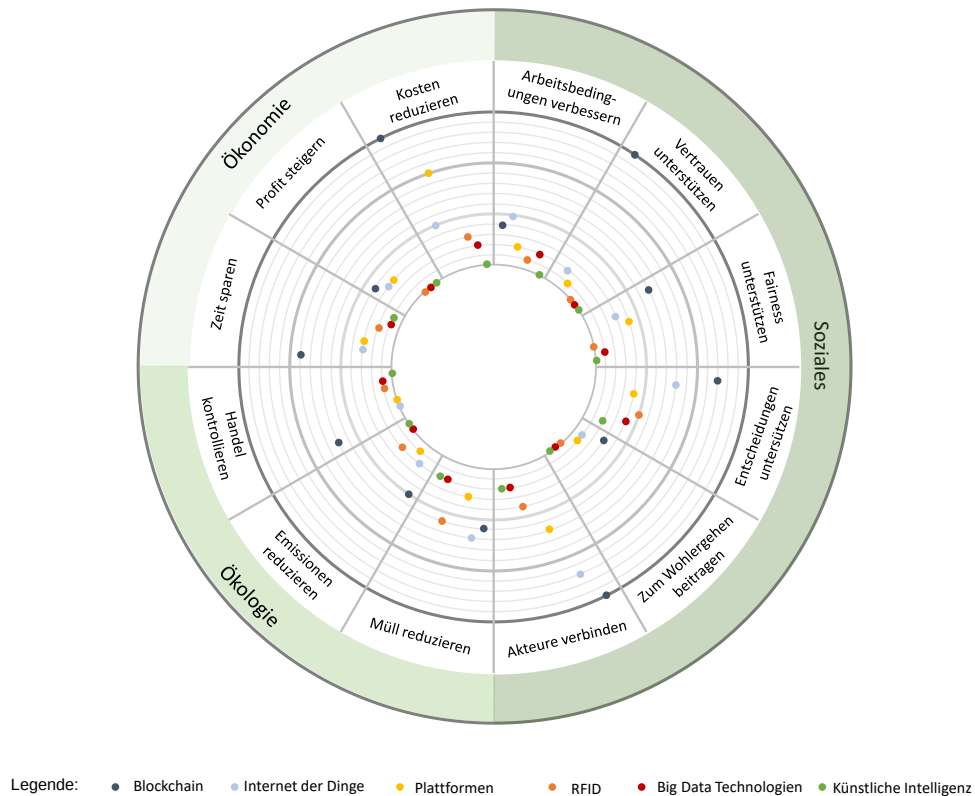


Abbildung 19: Technologieradar

Für das Entscheidungsmodell zur Technologieauswahl wurde zunächst eine Anforderungserhebung an das Metaverse durchgeführt, die auf zwei bei der Winter Simulation Conference 2024 angenommenen Papern basiert. Diese Arbeiten untersuchten einerseits Anwendungsfälle und Funktionen des Metaverse im Supply Chain Management, andererseits Potenziale und Barrieren bei der Nutzung des Metaverse in der CE. Auf Basis strukturierter Literaturrecherchen konnten Anforderungen synthetisiert werden, die sowohl die Ausschöpfung von Potenzialen als auch die Reduzierung bestehender Barrieren adressieren. Daraus ergaben sich konkrete Anwendungsbereiche, etwa Zusammenarbeit, Innovation, Produktdesign, Lernen und Training, Datenmanagement, Transport, Produktionsplanung, Kostenmanagement sowie Zugang und Nutzung, und jeweils zugehörige Anforderungen an ein Metaverse, das die CE unterstützt. Welche Potenziale und Barrieren das Metaverse für die CE bereithält, kann Abbildung 20 entnommen werden.

Collaboration	Innovation	Product Design
↗ more flexibility ↗ less space needed ↗ less traveling needed ↗ more efficiency ↘ high energy consumption through communication	↗ new circular business models, products, and services ↗ more human resources available ↗ new experiments ↘ difficult implementation of DTs	↗ facilitated showcasing ↗ substitution of physical products ↗ testing ↘ complex data transmission and sensor network system ↘ high computing power necessary
Learning and Training	Data	Transportation
↗ independency of real training environment ↗ improved efficiency ↗ facilitated knowledge transfer ↘ equipment requires rare materials ↘ realism difficult to obtain	↗ enhanced productivity ↗ more realistic simulations ↗ secure data transmission ↘ reluctance to data sharing ↘ high energy consumption ↘ complicated data management ↘ unauthorized access	↗ improved efficiency, controllability, adaptability, and decision-making ↗ more sustainable transportation planning ↘ complicated data management

Production Planning and Prediction	Costs	Access and Use
↗ on-demand production ↗ risk reduction ↗ more transparency and efficiency ↗ optimized DTs ↘ increased complexity	↗ cost reduction ↗ higher revenues ↘ initial expenses ↘ partly costly equipment ↘ higher electricity costs ↘ health treatment costs ↘ product cannibalization	↗ theoretically open to anyone ↘ requires robust internet connection, equipment, and IT systems ↘ health issues prevent from (prolonged) use ↘ reluctance to change ↘ difficult integration of legacy systems

Abbildung 20: Potenziale und Barrieren des Metaverse für die Kreislaufwirtschaft

Darauf aufbauend wurde eine Referenzbeschreibung eines Metaverse für die CE formuliert. Sie dient als Leitfaden für die Gestaltung eines Metaverse, das immersive, kollaborative und nachhaltige Interaktionen ermöglicht und dabei die Anforderungen an Data Spaces berücksichtigt. In dieser Beschreibung werden zentrale Eigenschaften und Dimensionen eines CE-orientierten Metaverse systematisiert, von der immersiven Kommunikation über realitätsnahe Simulationen bis hin zu interoperablen Dateninfrastrukturen.

Parallel dazu wurde ein Überblick über digitale Technologien in der CE erstellt, basierend auf einer strukturierten Literaturrecherche, die als Paper auf der Winter Simulation Conference 2025 angenommen wurde. Dabei wurden neun Schlüsseltechnologien identifiziert: Künstliche Intelligenz (AI), Internet of Things (IoT), Blockchain, Simulation, Cyber-Physische Systeme (CPS), Data Analytics, Digital Twins (DTs), Robotik und Extended Reality (XR), was auch für das Metaverse essenziell ist. Für jede Technologie wurden typische Funktionen und Anwendungsfälle in der CE erfasst, wie z. B. prädiktive Wartung, Ressourceneffizienz, Datenrückverfolgbarkeit, immersive Trainingsumgebungen oder Prozessautomatisierung. Alle Funktionen können Tabelle 13 entnommen werden.

Tabelle 13: Funktionen von digitalen Technologien in der CE

Digital technology	Identified functions
AI	Consumer behavior analysis; Demand prediction; Disassembly and remanufacturing assistance; Energy usage optimization; Personalized production; Predictive maintenance; Quality control; Waste sorting automatization and classification
IoT	Environmental impact monitoring; Life cycle data tracking and transmission; Predictive maintenance; Process automatization; Process management enhancements; Product design improvement
Blockchain	Data traceability; Tamper-proofing of data
Simulation	Condition assessment; Energy demand assessment; Energy usage optimization; Predictive maintenance; Process improvement; Product design improvement; Scenario analysis and decision support
CPS	Data-driven decision support; Energy and resource usage monitoring; Process automatization; Waste collection optimization; Waste sorting automatization
Data analytics	Consumer behavior analysis; Data-driven decision support; Environmental impact assessment; Financial management; Predictive maintenance; Product design improvement; Route optimization
DT	Condition monitoring; Data collection and representation; Data-driven decision support; Key performance indicator assessment; Smart contracts
Robotics	Dangerous task handling; Disassembly; Process automatization; Waste sorting automatization
XR	Immersive learning and training

Darüber hinaus wurden 22 Einflussfaktoren für die Technologieauswahl herausgearbeitet, um Voraussetzungen für das Entscheidungsmodell zu identifizieren. Diese reichen von unternehmensinternen Bedingungen (z. B. Veränderungsbereitschaft, finanzielle Mittel, Nutzungskompetenz) über externe Treiber (z. B. regulatorische Vorgaben, Marktdruck, Trends) bis hin

zu technologischen Aspekten (z. B. Komplexität, Kompatibilität, Datensicherheit). Als besonders ausschlaggebend wurden regulatorische Rahmenbedingungen, Implementierungs- und Betriebskosten, die Ressourceneffizienz sowie die Veränderungsbereitschaft in Unternehmen identifiziert.

Die Ableitung und Gewichtung von Zielkonflikten aus den Einflussfaktoren erleichtert Unternehmen die Technologieauswahl, da deutlich wird, welche Anforderungen sich widersprechen und wo besonders wichtige Abwägungen nötig sind. Die Zielkonflikte wurden aus den zuvor identifizierten Einflussfaktoren gebildet, indem analysiert wurde, welche Faktoren gegensätzliche Ziele verfolgen. Ihre Gewichtung ergibt sich daraus, wie häufig die jeweiligen Faktoren in der Literatur als entscheidend genannt wurden. Besonders relevant ist der Zielkonflikt „Regulatorische Vorgaben ↔ Flexibilität“, weil gesetzliche Anforderungen in fast allen Technologien eine verbindliche Rolle spielen und den Handlungsspielraum stark beeinflussen. Die gewichtete Betrachtung dieser Zielkonflikte bietet eine klare Grundlage, um technologische Optionen realistisch zu bewerten.

Im Rahmen der Untersuchung kollaborativer Orchestrierungskonzepte ist es zunächst wichtig zu verstehen, welche digitalen Strukturen und Organisationsformen diesen Ansatz prägen. Ein agentenbasiertes Ökosystem beschreibt ein digitales System aus autonomen, interagierenden Einheiten, die komplexe Abläufe simulieren (Whelan 2010), während eine dezentrale autonome Organisation eine blockchain-basierte Form gemeinschaftlicher Steuerung darstellt, deren Entscheidungen und Prozesse durch Smart Contracts automatisiert und ohne zentrale Instanz ausgeführt werden (Beck et al. 2018); (Wang et al. 2019). Beide Konzepte beruhen auf dezentral handelnden, regelbasierten Einheiten, die kooperieren oder konkurrieren und dadurch transparente, selbstorganisierte Systeme ermöglichen.

Gerade für das Metaverse sind solche kollaborativen Orchestrierungen zentral, weil hier unterschiedlichste Technologien wie KI, XR und DTs zusammenwirken. Durch die Kombination aus agentenbasierten Interaktionen und dezentralen Entscheidungsmechanismen wie DAOs können Prozesse, Ressourcen und Entscheidungen transparent, flexibel und skalierbar koordiniert werden (Qin et al. 2023) (Yang et al. 2022). Damit bilden kollaborative Orchestrierungskonzepte eine wesentliche Grundlage für funktionierende Metaverse-Anwendungen, etwa in Smart Cities, immersiven Arbeitsumgebungen oder kreislaufwirtschaftlichen digitalen Ökosystemen.

Durch die Verbindung dieser Arbeitsschritte entsteht eine konsistente Grundlage: Die Funktionen digitaler Technologien werden nicht isoliert betrachtet, sondern in den Kontext spezifischer Anforderungen, Einflussfaktoren und Gestaltungsvorgaben eingeordnet. Aus den vorherigen Ergebnissen konnte ein Entscheidungsmodell zur Technologieauswahl in der CE entwickelt werden, dessen Ziel es ist, die vorherigen Ergebnisse zu synthetisieren, um Unternehmen eine Hilfestellung zu geben, welche digitale Technologie Sie für bestimmte angestrebte Funktionen verwenden können. Dabei wird ebenso berücksichtigt, welche Einflussfaktoren und Zielkonflikte bei der Entscheidungsfindung in Unternehmen eine zentrale Rolle spielen.

Die Entwicklung des Modells erfolgte auf Basis der zuvor durchgeführten SLR, in der 22 Einflussfaktoren sowie besonders ausschlaggebende Faktoren identifiziert wurden. Auf Grundlage dieser Faktoren wurden Zielkonflikte gebildet, welche mithilfe der zuvor ermittelten Gewichtungen ebenfalls differenziert werden konnten. Ebenfalls zentral war die Identifikation digitaler Technologien, die in der CE diskutiert werden, diese Zuordnung erfolgte anhand des Papers „Review of Digital Technologies for the CE and the Role of Simulation“ von Kunert et al. (2025). Darin wurden die folgenden Technologien erfasst: KI, Blockchain, IoT, CPS, Robotik, Data Analytics, XR, DT und Simulation. Im Rahmen des Papers wurden zudem die Funktionen herausgearbeitet, die die identifizierten Technologien in der CE erfüllen können. Zur besseren Nachvollziehbarkeit fasst die folgende Tabelle 14 die wichtigsten Arbeitsschritte bei der Erstellung des Entscheidungsmodells noch einmal kurz zusammen:

Tabelle 14: Erstellung des Entscheidungsmodells

Schritt	Beschreibung
1. Identifikation relevanter digitaler Technologien für die CE	Im Paper „Review of Digital Technologies for the Circular Economy and the Role of Simulation“ von der Winter Simulation Conference 2025 wurden mittels einer SLR digitale Technologien

	identifiziert, die von aktueller Literatur für die CE vorgeschlagen werden.
2. Identifikation der für die CE relevanten Funktionen der Technologien	Im selben Paper wurden ebenfalls für die CE relevante Funktionen dieser Technologien ermittelt.
3. Ermittlung von Einflussfaktoren	Aus einer SLR wurden 22 Einflussfaktoren extrahiert, die laut Literatur die Auswahl digitaler Technologien in Unternehmen beeinflussen.
4. Hervorhebung besonders relevanter Faktoren	Die Literatur betont bestimmte Faktoren als besonders ausschlaggebend für die Technologieauswahl, z. B. Veränderungsbereitschaft, regulatorische Vorgaben, Implementierungs- und Betriebskosten sowie Ressourcen- und Energieeffizienz.
5. Bildung von Zielkonflikten	Auf Basis der identifizierten Faktoren wurden Zielkonfliktpaare gebildet, die aufzeigen, welche Abwägungen Unternehmen bei der Entscheidung berücksichtigen müssen.
6. Identifikation von Potenzialen und Barrieren für das Metaverse in der CE	Da im AP ein besonderer Fokus auf dem Metaverse für die CE liegt, wurden im Paper „Potentials and Barriers of the Metaverse for the Circular Economy“ von Kunert et al. (2024) Potenziale und Barrieren ermittelt. Diese Ergebnisse bieten Unternehmen eine auf Metaverse-Anwendungen spezifizierte Orientierungshilfe, um zu beurteilen, ob und in welcher Form XR- bzw. Metaverse-Technologien geeignet sind, um Prinzipien der CE umzusetzen.

Auf Basis dieser Schritte wird im Folgenden das Entscheidungsmodell erläutert.

Abbildung 21 stellt ein funktionszentriertes Entscheidungsmodell zur Auswahl digitaler Technologien in der CE dar. Es verknüpft angestrebte Unternehmensfunktionen mit den entsprechenden Technologien auf Grundlage der in Kapitel 4.1 dargestellten Ergebnisse. Die in der SLR identifizierten 22 allgemeinen Einflussfaktoren dienen als übergeordnete Entscheidungskriterien, ohne einer bestimmten Technologie zugeordnet zu sein. Ergänzend verdeutlichen die Zielkonflikte typische Abwägungen zwischen konkurrierenden Einflussfaktoren, die bei der Entscheidungsfindung berücksichtigt werden sollten. Stark gewichtete Einflussfaktoren und Zielkonflikte sind kursiv dargestellt. Das Modell unterstützt Unternehmen dabei, von einer gewünschten Funktion ausgehend geeignete Technologien zu identifizieren, relevante Einflussfaktoren zu reflektieren und Zielkonflikte zu berücksichtigen. Es trägt somit zu erhöhter Transparenz bei der komplexen Technologieauswahl in der CE bei.

Bezüglich der neunten identifizierten digitalen Technologie, XR, ist zu beachten, dass nicht Metaverse an sich als Technologie in der Literatur für die CE vorgeschlagen wird, sondern XR. Da XR in vielen Definitionen des Metaverse einen essenziellen Bestandteil darstellt (Dwivedi et al. 2022), können die im Paper ermittelten Potenziale und Barrieren für XR beachtet werden, falls XR für eine gewünschte Funktion in Frage kommt. Zusätzlich können die bisherigen Ergebnisse zum Metaverse, wie die Referenzbeschreibung und die Anforderungen für die Abwägung herangezogen werden.

Beispielsweise könnte ein Unternehmen automatisierte Abfallsortierung umsetzen wollen, um ihren Recyclingprozess effizienter zu gestalten. Das Unternehmen prüft laut Modell, dass hierfür KI, CPS und Robotik geeignet sind. Soll zusätzlich eine Klassifizierung von Abfällen erfolgen, kommt ausschließlich KI infrage, da nur diese Technologie laut Literatur diese Funktion erfüllt. Anschließend bewertet es intern die Relevanz der Einflussfaktoren (z. B. ob das Unternehmen bereits Know-how zu Robotik hat, was den Einflussfaktor Nutzungskompetenz wegfallen lässt) und wägt die Zielkonflikte ab. So kann es nachvollziehen, welche Technologie unter den individuellen Rahmenbedingungen am geeignetsten ist. Es ist anzumerken, dass in der Literatur häufig Technologien gemeinsam vorgeschlagen werden und daher ein gemeinsamer Einsatz sinnvoll sein kann (Kunert et al. 2025).

Auswahl von Technologien für die CE

1. Welche Funktion soll erfüllt werden?

Funktion	Technologie	Funktion	Technologie
Zustandsbewertung	Simulation	Rückverfolgung und Übertragung von Lebenszyklusdaten	IoT
Analyse des Verbraucherverhaltens	KI, Data Analytics	Personalisierte Produktion	KI
Datenerfassung und -darstellung	DT	Vorausschauende Wartung	KI, IoT, Simulation, Data Analytics
Datenbasierte Entscheidungsunterstützung	CPS, Data Analytics, DT, Simulation	Prozessautomatisierung	IoT, CPS, Robotik
Rückverfolgbarkeit von Daten	Blockchain	Prozessverbesserung	Simulation
Durchführung gefährlicher Aufgaben	Robotik	Verbesserung des Prozessmanagements	IoT
Nachfragevorhersage	KI	Verbesserung des Produktdesigns	IoT, Simulation, Data Analytics
Unterstützung bei der Demontage	KI, Robotik	Qualitätskontrolle	KI
Bewertung des Energiebedarfs	Simulation	Unterstützung beim Remanufacturing	KI
Optimierung des Energieverbrauchs	KI, Simulation	Routenoptimierung	Data Analytics
Überwachung von Energie- und Ressourcennutzung	CPS	Szenarioanalyse und Entscheidungsunterstützung	Simulation
Bewertung von Umweltauswirkungen	IoT, Data Analytics	Smart Contracts	DT
Finanzmanagement	Data Analytics	Manipulationssichere Datenspeicherung	Blockchain
Immersives Lernen und Training	XR	Optimierung der Abfallsammlung	CPS
Bewertung von Key Performance Indicators	DT	Automatisierte Abfallsortierung	KI, CPS, Robotik
		Klassifizierung von Abfällen	KI

2. Welche Faktoren beeinflussen die Auswahl?

- *Veränderungsbereitschaft und Akzeptanz*
- *Regulatorische Vorgaben*
- *Marktdruck*
- *Anreizsysteme*
- *Trends*
- *Verfügbare finanzielle Mittel*
- *Eindeutigkeit des finanziellen Nutzens*
- *Implementierungs- und Betriebskosten*
- *Ressourcen- und Energieeffizienz*
- *Zirkuläre Geschäftsmodelle*
- Ausrichtung der Supply-Chain-Partner
- Datenerfassungsfähigkeit
- Datenverfügbarkeit
- Notwendigkeit, Daten zu teilen
- Datensicherheit
- Sicherheit
- Zusammenarbeit
- Technologische Voraussetzungen
- Komplexität
- Kompatibilität
- Nutzungskompetenz
- Flexibilität

3. Welche Zielkonflikte müssen beachtet werden?

Implementierungs- und Betriebskosten	↔	Ressourcen- und Energieeffizienz
Regulatorische Vorgaben	↔	Flexibilität
Komplexität	↔	Veränderungsbereitschaft und Akzeptanz
Kompatibilität	↔	Innovationsgrad / technologische Voraussetzungen
Marktdruck	↔	Datensicherheit
Zusammenarbeit	↔	Vertraulichkeit / Datensicherheit
Ressourcen- und Energieeffizienz	↔	Implementierungsgeschwindigkeit

DIONA

Abbildung 21: Entscheidungsmodell zur Technologieauswahl

Falls XR infrage kommt, empfiehlt sich ein Blick in die vorherigen Teilergebnisse, sowie in das Paper „Potentials and Barriers of the Metaverse for the Circular Economy“ von Kunert et al. (2024). Außerdem

finden sich im Paper "Review of Digital Technologies for the Circular Economy and the Role of Simulation" von Kunert et al. (2025) genauere Erläuterungen zu den Funktionen und in welchen Use Cases die Funktionen der Technologien bereits umgesetzt sind.

Da der Fokus des APs auf dem Metaverse lag, wurde, wie in zuvor beschrieben, unter anderem ein Paper zu dessen Potenzialen und Barrieren für die CE verfasst. Aus diesem Paper lassen sich exemplarisch Aussagen zu den Einflussfaktoren ableiten, die bei der Auswahl des Metaverse, bzw. XR, als Technologie zu berücksichtigen sind.

So weist die im Paper identifizierte Barriere des Widerstands gegen Veränderung auf die starke Bedeutung des Einflussfaktors Veränderungsbereitschaft und Akzeptanz hin. Daher zeigt sich auch besonders der Zielkonflikt zwischen Veränderungsbereitschaft und Akzeptanz und Komplexität, da die Einführung komplexer Systeme häufig auf Akzeptanzhürden innerhalb der Organisation stößt. Deswegen sollte bei der Adaption von Metaverse-Applikationen darauf geachtet werden, eine technologieoffene Unternehmenskultur zu fördern.

Ebenso ist der Einflussfaktor Implementierungs- und Betriebskosten relevant, da, abhängig von der spezifischen Metaverse-Applikation, signifikante Investitionen für Equipment, Software, Schulungen und den Energieverbrauch anfallen können. Dabei ergibt sich häufig der Zielkonflikt zwischen Implementierungs- und Betriebskosten sowie Ressourcen- und Energieeffizienz, da zwar ökologische Potenziale wie weniger notwendige Reisen durch virtuelle Zusammenarbeit bestehen, diese jedoch mit hohen Energie- und Rechenanforderungen verbunden sein können.

Darüber hinaus muss die Nutzungskompetenz im Umgang mit XR- und Metaverse-Anwendungen aufgebaut werden, um geeignete Lösungen für das jeweilige Unternehmen identifizieren und einsetzen zu können. Abschließend ist zu betonen, dass individuelle Abwägungen zwischen den identifizierten Einflussfaktoren, den damit verbundenen Zielkonflikten und den zur Auswahl stehenden Technologien erforderlich sind, um eine technologieadäquate Entscheidung treffen zu können.

Digital gestützte Geschäftsprozesse in der Kreislaufwirtschaft

Im Rahmen von AP1.3 war es Aufgabe, Best Practices und neue Technologien im Prozessmanagement zur Schließung von Wertschöpfungskreisläufen zu untersuchen. Zu den kritischen Zielen zählten (1) Die Konzeptionierung digital unterstützter Prozesse in der CE, (2) ein konzeptioneller Rahmen in Form von Gestaltungsaufgaben, IT- und Datenarchitektur für digital unterstützte Prozesse zu gestalten, und (3) Gestaltungsrichtlinien für die Einführung durchgehender digitaler Lösungen zu entwickeln. Zur Erfüllung des ersten Meilensteins wurden dazu Anforderungen aus der CE und verwandten Forschungsbereichen des GPM, wie das grüne und nachhaltige GPM herangezogen, um Geschäftsprozesse der CE zu charakterisieren und zusammenhängende Unterstützungsmöglichkeiten aus der Literatur und den im AP1.1 geführten Interviews zu extrahieren. Diese wurden anschließend mit einer IT- und Datensicht untersucht und in das GPM-System, welches zur Ausführung von digital unterstützten Geschäftsprozessen dient, integriert.

Zur Erfüllung des zweiten Meilensteins wurde die IT- und Datensicht vertieft. Insbesondere sollte die zirkuläre Wertschöpfung durch die Anwendung von digitalen Technologien aufgezeigt werden. Identifizierte digitale Wertschöpfungsmuster wurden analysiert, aus denen Gestaltungsaufgaben für GPM-Systeme abgeleitet werden konnten. Zusätzlich wurden Daten- und IT-Architekturen für am Markt verfügbare GPM-Systeme analysiert, sowie Steckbriefe dazu erstellt. Dies resultierte in einer GPM-Systemarchitektur, welche IT und Datenflüsse, die zur Gestaltung einer CE notwendig sind, berücksichtigt. Die Ergebnisse sind in einem Whitepaper festgehalten und können über den Mobilkreis-Hub eingesehen werden.

Zu Entwicklung von Gestaltungsrichtlinien, insbesondere für KMUs und Wertschöpfungsnetzwerke, wurde das After-Sales Management und die Rückführungslogistik als Beispiel für Kerntreiber zur Schließung von Wertschöpfungskreisläufen im Kontext des Automobilsektors näher betrachtet. Hier sollte erkannt werden, inwiefern Wertschöpfungsmuster bewusst, sowie unbewusst in diesem Bereich bereits angewendet werden. Zwei wissenschaftliche Veröffentlichungen entsprangen der Forschung. Einerseits wurde eine Taxonomie zur Klassifizierung von Wertschöpfungsmustern für Geschäftsprozesse in der CE entwickelt und andererseits technische Gestaltungsrichtlinien für GPM-Systeme in der CE. Die Taxonomie wurde mit der Veröffentlichung „A Taxonomy for Redesigning After-Sales with the Digital Twin from an explorative Business Process Management Perspective“ (Schrage

und Dinter 2026) und die Gestaltungsrichtlinien in der Veröffentlichung „Towards designing a Business Process Management System for the Circular Economy“ (Schrage und Dinter 2025) auf fachrelevanten wissenschaftlichen Konferenzen publiziert. Beide Veröffentlichungen wurden diesem Bericht beigelegt.

Ergebnisse

Ziel im API.3.1 war es, zu analysieren, inwiefern bestehende Konzepte wie das grüne GPM und nachhaltiges GPM bereits Beiträge zur ökologischen und sozialen Transformation leisten. Ausgangspunkt bildete die Auseinandersetzung mit dem Forschungsfeld des grünen GPMs. Grünes GPM zielt darauf ab, ökologische Zielgrößen z.B. Energieeffizienz, Ressourcenschonung oder Emissionsminderung systematisch in den GPM-Lebenszyklus zu integrieren (vom Brocke et al. 2012). Aufbauend auf klassischen GPM-Elementen wie strategischer Ausrichtung, Governance, Methoden, Informations- und Kommunikationstechnologien, Menschen und Kultur erweitert das grüne GPM diese um ökologische Kennzahlen und Steuerungsmechanismen (Couckuyt 2018). In der Literatur wird grünes GPM als Weiterentwicklung verstanden, die den Einfluss von Prozessen auf Umweltfaktoren messbar macht. Nachhaltiges GPM geht darüber hinaus und schließt neben einer ökologischen auch eine soziale und ökonomische Dimension mit ein. Ziel ist die Schaffung einer Balance zwischen den drei Dimensionen nachhaltiger Entwicklung (Couckuyt und van Looy 2020).

Die Analyse und das durchgeführte Literaturreview zeigte, dass GPM-Methoden zahlreiche Ansatzpunkte zur Unterstützung nachhaltiger Transformationen bieten (Couckuyt und van Looy 2020; Ahmad und van Looy 2020). Dazu zählen die Integration digitaler Technologien wie Internet of Things (IoT), künstliche Intelligenz (KI) oder Data Spaces zur Erfassung von Produktnutzungsdaten über den gesamten Lebenszyklus hinweg, die Erweiterung bestehender Prozesskennzahlen um ökologische Indikatoren, der Aufbau kollaborativer Strukturen für organisationsübergreifende Zusammenarbeit sowie der Einsatz von Gamification- und Lernmodulen zur Förderung nachhaltiger Verhaltensweisen bei Mitarbeitenden. Im nächsten Schritt wurden die Anforderungen der CE an das GPM erarbeitet. Die CE verfolgt das Ziel, Wertschöpfungsketten zu schließen und Ressourcen möglichst lange im Umlauf zu halten. Damit verbunden ist ein Paradigmenwechsel vom linearen zum zirkulären Wirtschaften, der auch die Steuerung von Prozessen grundlegend verändert. Für das Prozessmanagement ergibt sich daraus die Notwendigkeit, Datenflüsse über Unternehmens- und Systemgrenzen hinweg zu verknüpfen, Transparenz über den Zustand und die Nutzung von Produkten zu schaffen und Entscheidungen auf Basis von Nachhaltigkeitsindikatoren zu unterstützen (Kirchherr et al. 2017). Die Untersuchung ergab, dass GPM-Systeme künftig drei zentrale Anforderungsebenen adressieren müssen. Erstens erfordert die CE eine strategische Erweiterung von GPM, bei der Nachhaltigkeitsziele direkt in die Prozessziele integriert werden. Zweitens ergeben sich methodische und technologische Anforderungen, die auf Flexibilität, Offenheit und Interoperabilität abzielen. GPM-Systeme müssen daher Systemanbindungen zum Beispiel durch Data Spaces bereitstellen, sowie Mechanismen zur Erfassung, Integration und Auswertung von Produkt- und Prozessdaten bereitstellen, um ökologische und zirkuläre Leistungsindikatoren sichtbar zu machen. Drittens bestehen kulturelle und organisatorische Anforderungen, die insbesondere auf Kollaboration, geteiltes Verständnis und Lernfähigkeit abzielen. Die Gestaltung einer nachhaltigen Prozesskultur erfordert entsprechend Instrumente, die Wissen teilen, Motivation fördern und die Partizipation unterschiedlicher Akteure erleichtern.

Auf Grundlage dieser Erkenntnisse wurden im letzten Schritt Designprinzipien entwickelt, die in einer GPM-Systemdarstellung zusammengeführt wurden. Die Prinzipien wurden im Sinne des Ansatzes von Gregor et al. (2020) formuliert und definieren Mechanismen, Rollen und Zielrichtungen, mit denen GPM-Systeme auf die Anforderungen der CE reagieren können. Sie umfassen sowohl technische als auch soziale und organisatorische Gestaltungsaspekte. Zu den zentralen Prinzipien zählen unter anderem das Prinzip des gemeinsamen Verständnisses (Shared Understanding), das den Aufbau einer gemeinsamen Wissensbasis über Nachhaltigkeitsziele fördert, sowie das Prinzip des Multiuser Access, das die kollaborative Bearbeitung von Prozessmodellen ermöglicht. Darüber hinaus adressieren Prinzipien wie API Management und Data Spaces die technische Vernetzung und Datensouveränität in unternehmensübergreifenden Kreislaufsystemen. Weitere Prinzipien wie Sustainability Indicators, Gamification und Learning Resources unterstützen die Verankerung nachhaltigen Handelns und Lernens im Prozessalltag.

Diese Designprinzipien wurden abschließend in ein erweitertes Modell des GPM-Systems integriert, das technische Komponenten (z. B. Ausführungsengine, Worklist Handler, Monitoring Tools) und

zentrale Akteure (z. B. Prozessanalyst, Systemingenieur, Prozessbeteiligte) umfasst. Dadurch entstand eine erweiterte sozio-technische Perspektive auf das Prozessmanagement, die technologische Innovationen mit organisatorischer Lernfähigkeit und kultureller Offenheit verbindet.

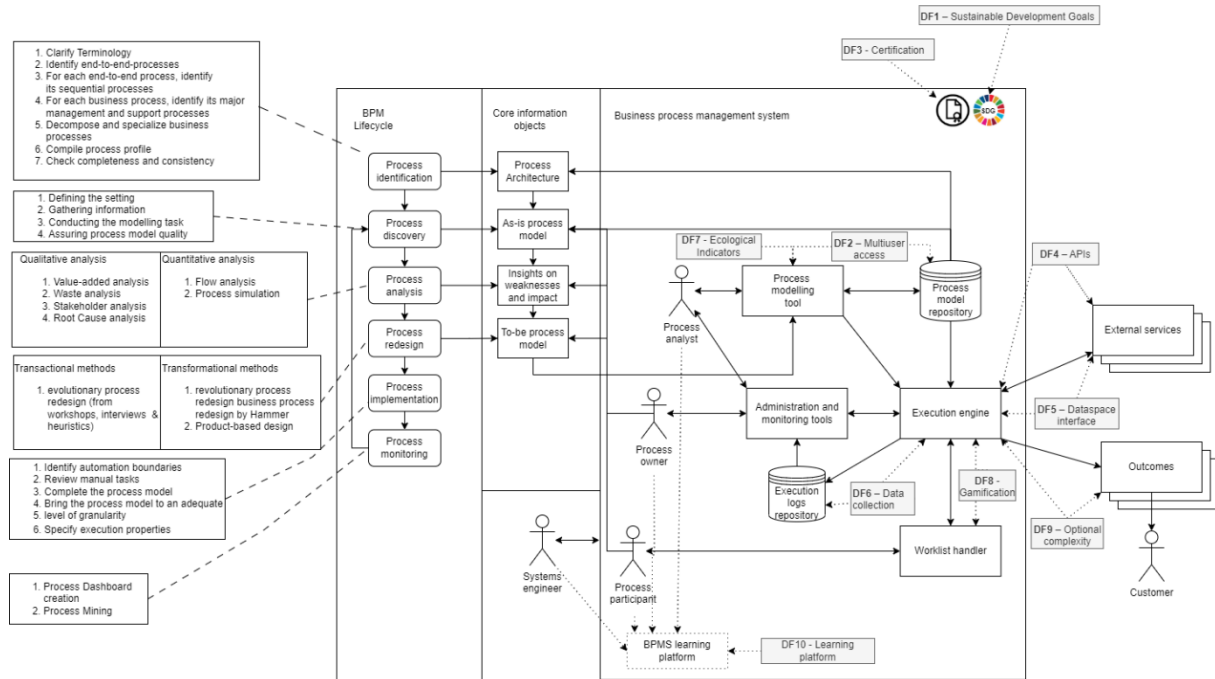


Abbildung 22: GPM-System für die Kreislaufwirtschaft

Zusätzlich wurden die Ergebnisse KMU-freundlich zusammen mit dem Technologieradar und einer Übersicht, in welchen Domänen Data Spaces angewendet werden, in einem Whitepaper konsolidiert.

Im AP1.3.2 wurde die IT- und Datensicht stärker vertieft. Für die Gestaltung einer IT- und Datenarchitektur wurden verschiedene GPM-Softwaretools wie Camunda, SAP Signavio und Kogito analysiert. Zu den verfügbaren Softwaretools wurden Steckbriefe erstellt, welche dem Leitfaden für digital unterstützte Prozesse hinzugefügt wurden, welcher auch auf dem Mobilkreis-Hub veröffentlicht wurde. Ergänzend dazu wurde eine umfassende Literaturanalyse zu GPM-Systemen durchgeführt, um aktuelle Entwicklungen und Best Practices zu identifizieren. Diese Analyse trug dazu bei, ein ganzheitliches Verständnis moderner GPM-Systemarchitekturen zu entwickeln und deren praktische Umsetzung zu unterstützen. Während die vorherigen Anforderungen sich auf eine Soll-Stand beziehen hinsichtlich der CE, befasst sich diese Untersuchung mit dem Ist-Stand der am Markt den Unternehmen zur Verfügung steht.

Mit der Untersuchung wurden daher die technischen Möglichkeiten verschiedener GPM-Systeme erarbeitet. Auch wurde untersucht, welchen Zweck verfügbare Daten und Technologien erfüllen. Folgendes Modell wurde dazu entwickelt:

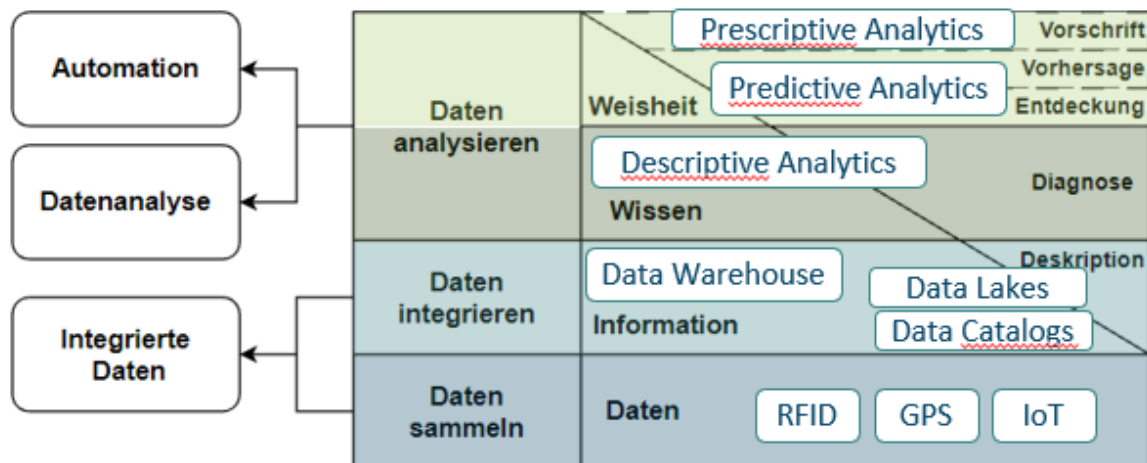


Abbildung 23: DIKW-Hierarchie mit digitalen Technologien

Das Modell verdeutlicht, wie digitale Technologien entlang der Daten-Informationen-Wissen-Weisheit-Kette (DIKW-Modell) zur Wertschöpfung in Geschäftsprozessen beitragen. Auf der untersten Ebene werden mithilfe von Technologien wie RFID, GPS und IoT Rohdaten gesammelt, die den Ausgangspunkt für digitale Wertschöpfung bilden. Durch Systeme wie Data Warehouses, Data Lakes oder Data Catalogs werden diese Daten integriert, strukturiert und zu nutzbarer Information verarbeitet, wodurch Transparenz und Entscheidungsgrundlagen in Prozessen entstehen. In der nächsten Stufe werden mithilfe analytischer Verfahren – etwa Descriptive, Predictive und Prescriptive Analytics – Informationen in Wissen überführt, das die Analyse, Vorhersage und Optimierung von Geschäftsprozessen ermöglicht. Auf der höchsten Ebene führen diese Erkenntnisse zu automatisierten und intelligent gesteuerten Prozessen, wodurch Effizienz, Qualität und Nachhaltigkeit gesteigert werden. Das Modell zeigt somit, dass jede technologische Ebene einen höheren Beitrag zur Wertschöpfung leistet, indem sie Geschäftsprozesse datengetriebener, lernfähiger und letztlich autonomer macht.

Bei der Entwicklung von Gestaltungsrichtlinien wurde der Schwerpunkt auf die Analyse von Wartungs- und After-Sales-Prozessen im Automobilsektor gelegt. Ziel war es, die Veränderungen von Wartungsprozessen im Zusammenhang mit der zunehmenden Integration digitaler Technologien zu untersuchen und daraus Gestaltungsrichtlinien für digital unterstützte Geschäftsprozesse in zirkulären Wertschöpfungssystemen abzuleiten.

Die Ergebnisse dieser Arbeiten sind in der publizierten Veröffentlichung „A Taxonomy for Redesigning After-Sales with the Digital Twin from an explorative Business Process Management Perspective“ dokumentiert. Diese Untersuchung befasst sich mit der Frage, wie Digitale Zwillinge die Gestaltung von After-Sales-Prozessen verändern können. Auf Grundlage eines explorativen GPM-Ansatzes wurde eine Taxonomie entwickelt, die beschreibt, wie zentrale Funktionen des Digitalen Zwillings – wie Monitoring, Vorhersage, Simulation und Steuerung – in After-Sales-Services integriert werden können, um neue Wertschöpfungspotenziale zu erschließen. Die Analyse von Fahrzeugdiagnose- und Reparaturdiensten aus den Jahren 1991 bis 2024 zeigte, dass die Mehrheit der Angebote weiterhin produktorientiert und manuell gestaltet sind, während digital unterstützte, nutzungsorientierte oder ergebnisorientierte Serviceformen bislang nur in begrenztem Umfang umgesetzt werden. Vollständig autonome Modelle sind derzeit noch nicht vorhanden.

Die Ergebnisse verdeutlichen, dass der technologische Fortschritt im Bereich Digitaler Zwillinge die organisatorische Implementierung deutlich übersteigt. Daraus ergibt sich ein erheblicher Bedarf, bestehende After-Sales-Strukturen durch geeignete Prozess- und Systemgestaltung an die Anforderungen digitaler und zirkulärer Geschäftsmodelle anzupassen. Die entwickelte Taxonomie liefert hierfür eine Grundlage, indem sie zentrale Einflussdimensionen systematisch erfasst und als Orientierungsrahmen für die Ausgestaltung digitaler Serviceprozesse nutzbar macht.

Die Taxonomie umfasst mehrere Dimensionen, die den Zusammenhang zwischen Servicecharakter, digitaler Unterstützung und prozessualer Gestaltung abbilden:

Meta-Characteristic	Dimension	Characteristics
After-Sales	Service Type	Product-oriented, Use-oriented, Result-oriented
	Customer Effort	Assisted, Guided, Autonomous
Digital Twin	DT Information Product	Measures & Descriptions, Predictions & Prescriptions, Simulations, Controls
	DT Media Format	Text, Visual, Interactive
	DT Information Value	Inform, Interact, Exchange, Transact, Optimize, Orchestrate
Business Process Management	C2P Interaction	Hybrid-guided, Autonomous-approval, Autonomous-silent
	O2P Interaction	Hybrid-guided, Autonomous-approval, Autonomous-silent

Tabelle 15: Taxonomie für die Gestaltung von After-Sales Prozessen in der Automobilindustrie

Aufbauend auf diesen Erkenntnissen wurde im weiteren Verlauf des APs untersucht, wie GPM-Systeme technisch so ausgestaltet werden können, dass sie die in der Taxonomie beschriebenen digitalen und zirkulären Prozessanforderungen abbilden. Hieraus resultierte die zweite wissenschaftliche Veröffentlichung „Towards Designing a Business Process Management System for the Circular Economy“ (Schrage und Dinter 2025).

Diese Arbeit adressiert die Frage, wie GPM-Systeme an die besonderen Anforderungen der CE angepasst werden können. Ausgangspunkt war die Feststellung, dass bestehende GPMS primär auf lineare Prozesse und zentrale Datenhaltung ausgerichtet sind und damit weder Dezentralität noch soziale und regulatorische Anforderungen nachhaltiger Wertschöpfungssysteme adäquat berücksichtigen. Zur Beantwortung dieser Fragestellung wurde der Design-Science-Research-Ansatz angewendet. Im Ergebnis entstand ein konzeptionelles Architekturmodell, das GPMS als sozio-technische Systeme versteht, in denen technologische Komponenten und organisatorische Strukturen gemeinsam zur Erreichung zirkulärer Ziele beitragen.

Aufbauend auf der Cognitive Load Theory und der Soziotechnischen Systemtheorie wurden Schwächen bestehender Architekturen identifiziert und sieben Gestaltungsmerkmale abgeleitet. Diese umfassen unter anderem:

- die Einbindung klar definierter Stakeholder-Rollen,
- eine dezentrale und skalierbare Prozessausführung,
- KI-gestützte Prozessmodellierung,
- Datenkataloge zur Nachverfolgbarkeit,
- Compliance-Prüfungen zur Sicherstellung von Nachhaltigkeitsstandards,
- Mechanismen zur transparenten Datenverarbeitung sowie
- die modulare Integration digitaler Technologien.

Das entwickelte GPMS-Modell kombiniert KI-basierte Modellierung, cloud-native Ausführung, Compliance-Engines und datengetriebene Transparenz entlang des gesamten Produktlebenszyklus. Digitale und physische Services werden entlang der Data-Information-Knowledge-Wisdom-(DIKW)-Hierarchie strukturiert, um den Beitrag digitaler Technologien (z. B. Internet of Things, Machine Learning, Robotik) zur CE systematisch abzubilden. Die theoretisch evaluierte Architektur bildet eine Grundlage für zukünftige empirische Untersuchungen und unterstützt die Entwicklung nachhaltiger, digital integrierter GPMS.

Mit der Kombination beider wissenschaftlicher Arbeiten – der Taxonomie für digitale Serviceprozesse und dem konzeptionellen Architekturmodell für GPMS – konnte der dritte Meilenstein des APs 1.3 erfolgreich abgeschlossen werden. Beide Ergebnisse tragen gemeinsam dazu bei, Gestaltungsrichtlinien für die Einführung durchgängiger digitaler Lösungen in der CE bereitzustellen.

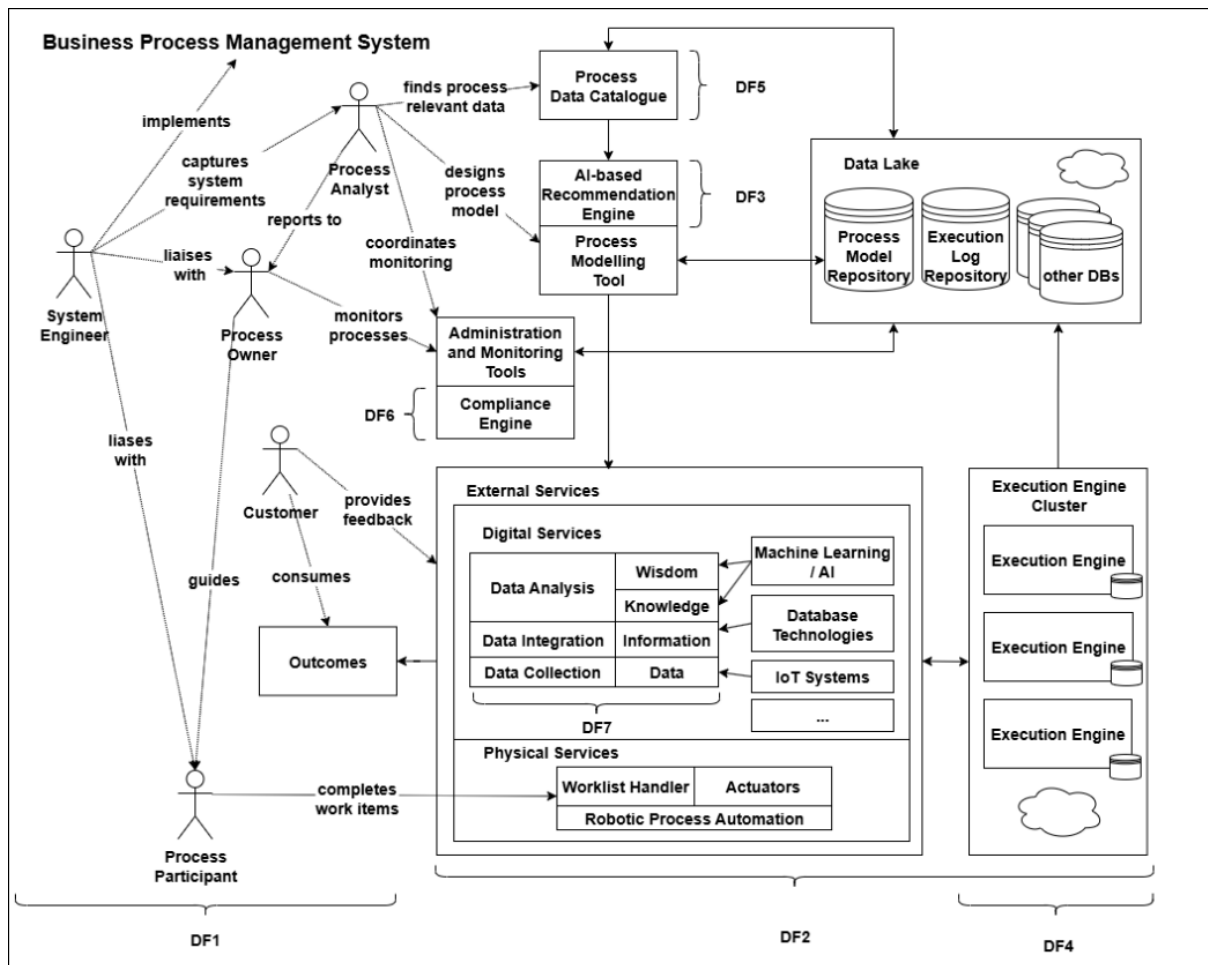


Abbildung 24: Geschäftsprozessmanagementsystemarchitektur für die Kreislaufwirtschaft

Die Untersuchung im Rahmen des AP 1.3 analysiert, wie digitales GPM durch die Integration ökologischer und sozialer Kennzahlen die Transformation zur CE unterstützen kann. Hierzu wurden systematische Anforderungen und Designprinzipien entwickelt, die technologische Innovationen wie IoT und Data Spaces mit organisatorischer Lernfähigkeit und kollaborativen Strukturen verbinden. Ein zentrales Ergebnis ist ein erweitertes sozio-technisches Architekturmodell für GPM-Systeme, das mithilfe der DIKW-Hierarchie den Wertbeitrag digitaler Technologien über den gesamten Produktlebenszyklus hinweg steuerbar macht. Ergänzend liefert eine entwickelte Taxonomie für After-Sales-Prozesse konkrete Gestaltungsrichtlinien, um das Potenzial Digitaler Zwillinge für zirkuläre Wertschöpfungs-systeme in der Praxis nutzbar zu machen.

Abschließend bieten die entwickelten Modelle und Leitfäden sowohl wissenschaftlich fundierte als auch praxisnahe Orientierungshilfen für die erfolgreiche Gestaltung von Geschäftsprozessen in der CE.

4 Werkzeugbaukästen

Kreislaufwirtschaft

4.1 Werkzeugbaukasten Anwendungsbeschreibung

Das übergeordnete Ziel von AP 3.1 bestand in der Erarbeitung einer systematischen Grundlage für die Identifikation, Beschreibung und Strukturierung von Anwendungsfällen der CE. Dazu wurden in drei aufeinander aufbauenden Teilarbeitspaketen die folgenden Artefakte entwickelt: (1) eine Taxonomie (AP 3.1.1), (2) eine Erhebung und Systematisierung situativer Einflussfaktoren (AP 3.1.2) sowie (3) eine Anwendungslandkarte, die beide Ergebnisse in einem ganzheitlichen Orientierungsrahmen zusammenführt (AP 3.1.3). Ergänzt wird die Landkarte durch Indikatoren und Validierungsmöglichkeiten aus AP 3.2.1. Die Entwicklung folgte dem Design-Science-Research-Paradigma (Peppers et al. 2007) und orientierte sich methodisch an den Arbeiten von (Oks et al. 2017, 2018) zur Entwicklung von Anwendungslandkarten für industrielle cyber-physische Systeme.

4.1.1 Konzeptionalisierung von Anwendungsbeschreibungen

Taxonomie der CE-Anwendungsfälle

Zunächst erfolgte die Extraktion, Generalisierung und Systematisierung von Anwendungsfällen der CE. Dazu wurden Anwendungsfälle aus den MobilKreis-Verbundprojekten extrahiert und in Anwendungsfallmustern nach (Alistair Cockburn 2000) dokumentiert. Anschließend wurden diese durch Anwendungsfälle aus Literatur und Praxis ergänzt und in einer Taxonomie nach (Nickerson et al. 2013) systematisiert.

Anwendungsfälle aus den MobilKreis-Verbundprojekten

Für die Analyse der MobilKreis-Verbundprojekte dienten die Projektbeschreibungen der Projekt-Webseiten, die Vorträge aus dem MobilKreis-Transfertreffen im März 2023 sowie Diskussionsbeiträge dieser Veranstaltung. Die Anwendungsfälle wurden in Anlehnung an die Anwendungsfallmuster nach Cockburn (1997) strukturiert dokumentiert.

Taxonomie-Entwicklung

Für die Systematisierung wurde dem Ansatz zur Entwicklung einer Taxonomie nach Nickerson et al. (2013) gefolgt. Dieses iterative Verfahren alterniert zwischen konzeptionell-zu-empirischen (C2E) und empirisch-zu-konzeptionellen (E2C) Ansätzen, bis vordefinierte Endbedingungen erfüllt sind. Das Verfahren durchlief drei Iterationen:

- Erste Iteration (C2E): Extraktion von Anwendungsfällen aus den MobilKreis-Verbundprojekten (Automobilbranche).
- Zweite Iteration (C2E): Systematisches Literaturreview nach (Webster und Watson 2002b) in der IEEE-Datenbank. Der Suchstring ("use case" OR application) AND ("circular economy" OR circularity) lieferte 65 relevante Artikel.
- Dritte Iteration (E2C): Internetrecherche, die 58 weitere Use Cases aus der Praxis identifizierte.

Insgesamt wurden 123 Use Cases aus wissenschaftlicher Literatur und Praxis untersucht und klassifiziert. Die Validität wurde anhand der 13 Endbedingungen nach Nickerson et al. (2013) überprüft.

Taxonomie

Die resultierende Taxonomie strukturiert CE-Anwendungsfälle entlang dreier Meta-Dimensionen mit jeweils zugeordneten Dimensionen und Ausprägungen (morphologische Box):

Meta-Dimension	Dimension	Features	E/N
----------------	-----------	----------	-----

Economy	Level	Micro				Meso				Macro				E
	Purpose	Innovation				Interaction				Transaction				N
Circularity	Strategy for the CE	Useful application of the material				Extend the life of the product and its parts				Intelligent product use and manufacturing				N
	R-Principles	R0	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	N		
	Transversality	generic						sector-specific						E
Technology	Function Category	Automation				Data Analysis				Data acquisition and integration				N
	Digital function	Auto-plan	Auto-control	Sort & classify	Optimize	Innovate	Forecast	Connect	Assess	Detect	Track & trace	Monitor	Share	Collect

Abbildung 25: Die Taxonomie für Anwendungsfälle in der Kreislaufwirtschaft (morphologische Box)

Deskriptive Befunde

Die Analyse der 123 Anwendungsfälle ergab folgende Verteilungen: Hinsichtlich der R-Prinzipien dominieren R8 (Recycling, n=33) und R2 (Reduce, n=23) deutlich. Für die übrigen Prinzipien (außer R9) liegt die Häufigkeit vergleichsweise niedrig zwischen n=2 und n=9. Bezüglich der Produktlebenszyklusphasen (Zeiss et al. 2021) zeigt sich eine ähnliche Verteilung zwischen Nachnutzungs- und Vornutzungsphase, während die Nutzungsphase geringer repräsentiert ist. Hinsichtlich der Transversalität wurde ein erheblicher Anteil der Anwendungsfälle als generisch klassifiziert, d. h. ohne Bindung an einen spezifischen Sektor.

Situative Einflussfaktoren

Als Vorbereitung für die Erstellung der Anwendungslandkarte wurden in AP 3.1.2 situative Einflussfaktoren erhoben. Dazu wurde eine systematische Literaturrecherche durchgeführt. Ziel war die Identifikation derjenigen Kontextbedingungen, die bestimmen, ob ein CE-Anwendungsfall technisch machbar, organisational umsetzbar und im Umfeld wirtschaftlich, regulatorisch und institutionell tragfähig ist. Die identifizierten Faktoren wurden in einer Konzeptmatrix dargestellt und entlang des TOE-Frameworks (Technology-Organization-Environment) nach (Tornatzky und Fleischer 1990) bewertet.

Situative Einflussfaktoren nach TOE

Über alle betrachteten Studien hinweg zeigt sich, dass CE-Anwendungsfälle nicht primär durch technische Lösungen selbst, sondern durch deren Einbettung in konkrete situative Kontextfaktoren bestimmt werden. Die Faktoren lassen sich systematisch drei Dimensionen zuordnen:

Tabelle 16: Situative Einflussfaktoren nach TOE-Dimensionen

Dimension	Zentrale Faktoren	Häufigkeit	Perspektive
Technologie (T)	Digitale Infrastruktur & Datenintegration; Technologische Reife & Verfügbarkeit; Interoperabilität & Systemintegration; Technologiekosten & Zugang	Sehr hoch bis hoch	Intern (I)
Organisation (O)	Finanzielle Ressourcen & Investitionsfähigkeit; Kompetenzen, Skills & CE-Wissen; Management-Commitment & CE-Strategie; Organisationskultur & Veränderungsbereitschaft	Sehr hoch bis hoch	Intern (I)
Environment (E)	Regulatorische Rahmenbedingungen & politische Unterstützung; Infrastruktur für Recycling &	Sehr hoch bis hoch	Extern (E)

	Rückführung; Marktdynamik & Nachfrage; Lieferkettenintegration & Kooperation		
--	--	--	--

Die fünf häufigsten Faktoren über alle Studien hinweg sind: (1) Finanzielle Ressourcen & Investitionsfähigkeit (O), (2) Regulatorische Rahmenbedingungen & politische Unterstützung (E), (3) Markt- und Nachfragesituation (E), (4) Digitale Infrastruktur & technologische Reife (T) sowie (5) Management-Commitment & organisationales Know-how (O).

Die Systematisierung nach dem TOE-Framework ermöglicht zugleich die Zuordnung zu einer internen und externen Perspektive: Technologie- und Organisationsfaktoren sind überwiegend intern beeinflussbar (I), während Umfeldfaktoren extern determiniert sind (E). Diese Unterscheidung wird in der Anwendungslandkarte als I/E-Markierung in die Konfigurationsmechanik überführt.

4.1.2 Anwendungslandkarte für die Kreislaufwirtschaft

Die Aufgabenstellung von AP 3.1.3 umfasste die Ableitung einer Anwendungslandkarte (2,5 PM), einschließlich der Identifikation von situativen Einflussfaktoren und deren Wirkung sowie der Abstraktion der Ergebnisse aus der Domäne Automobilindustrie zur Übertragung in andere Branchen. Das Vorhaben ist angelehnt an die Arbeiten von (Oks et al. 2017, 2018) zu Anwendungslandkarten für industrielle cyber-physische Systeme.

In einem interpretativen Prozess wurde auf Basis der in AP 3.1.1 erhobenen Anwendungsfälle und der in AP 3.1.2 erhobenen situativen Einflussfaktoren ein strukturierendes Artefakt in Anlehnung an (Oks et al. 2017) entwickelt. Basierend auf den Erkenntnissen aus AP 3.2.1 wurden zusätzlich Indikatoren und Validierungsmöglichkeiten in die Anwendungslandkarte integriert. Diese Erkenntnisse basieren auf einer Kombination aus systematischer Literaturrecherche, Desk-Research und einer gemeinsamen Interviewstudie in AP 3.1.1 mit der TU Dortmund und in AP 3.2.1 mit der TU Chemnitz. Das übergeordnete Thema der Interviews war Bewertungsmethoden für Nachhaltigkeit, insbesondere CE.

Das geplante Forschungsdesign sah ein zweistufiges Vorgehen vor: Zunächst sollte eine automobilspezifische Anwendungslandkarte entwickelt werden, die anschließend für sektorübergreifende Anwendbarkeit abstrahiert wird. In der Umsetzung wurde die Landkarte jedoch direkt auf generischer Ebene entwickelt. Diese Designentscheidung ist methodisch begründet durch vier Argumente:

Abstraktion in der Taxonomieentwicklung vorverlagert: Der iterative Taxonomieentwicklungsprozess nach (Nickerson et al. 2013) vollzog die Abstraktion von domänenspezifischen zu generalisierbaren Kategorien bereits innerhalb der drei Iterationen. Während die erste Iteration ausschließlich auf Automobil-Anwendungsfälle aus dem MobilKreis-Verbund zurückgriff, erweiterten die zweite und dritte Iteration die empirische Basis um Anwendungsfälle aus diversen Sektoren. Die resultierenden Dimensionen und Ausprägungen sind nicht automobilspezifisch. Ein sektorspezifisches Zwischenartefakt hätte die bereits vollzogene Generalisierung repliziert.

Empirische Evidenz aus der Transversalitätsdimension: Die Taxonomie enthält explizit die Dimension der Transversalität (generisch vs. sektorspezifisch). Die Analyse ergab, dass ein substantieller Anteil der 123 Anwendungsfälle als generisch klassifiziert wurde. Eine automobilspezifische Landkarte hätte primär generische Strukturen mit sektorspezifischen Bezeichnungen reproduziert.

Domänenunabhängige Natur der CE-Strategien: Die R-Prinzipien (Potting et al. 2017a) sind per Definition domänenunabhängig. Recycling, Remanufacturing, Reparatur und ähnliche Strategien folgen universellen Logiken. Zwischen Sektoren variiert die Instanziierung (z. B. Batterierecycling vs. Textilrecycling), nicht die strukturelle Positionierung.

Präzedenz bei Oks et al. (2017, 2018): Die CPS-Anwendungslandkarte wurde ebenfalls von Beginn an auf generischer Ebene entwickelt. Die Evaluation mit Automobil-OEMs, KMU und Start-ups diente als Validierungskontext, nicht als strukturelle Grundlage. Die Automobilbranche dient entsprechend auch in unserem Vorhaben als Demonstrations- und Evaluationskontext.

Die Automobilbranche wird durch diese Entscheidung nicht ignoriert: Sie liefert die empirische Grundlage durch die MobilKreis-Anwendungsfälle und dient als Kontext für Demonstration und Evaluation der Landkarte.

Struktur der Anwendungslandkarte

Das Artefakt ermöglicht es, Anwendungen in der CE auf Basis von Sphären zu strukturieren. Die Anwendungslandkarte ist entlang zweier primärer Achsen aufgebaut: Die vertikale Achse repräsentiert die Produktlebenszyklusphasen als Sphären (Pre-Use, In-Use, Post-Use), während eine Querschnittsspalte die Bereiche Daten, Governance und Service erfasst. Die Strukturierung folgt dem interpretativen Prozess, in dem die Taxonomie-Ergebnisse (AP 3.1.1) mit den situativen Einflussfaktoren (AP 3.1.2) zusammengeführt wurden.



Abbildung 26: Anwendungslandkarte

Pre-Use-Sphäre. Diese Sphäre umfasst drei Anwendungsfelder: (1) Rohstoff & Materialloops – Steuerung von Materialkreisläufen, Monomaterial und Trennbarkeit, Umgang mit Sekundärmaterialien, Herkunft und Qualität, Materialreduktion, -substitution und -verzicht. (2) Design for Circularity – Design for Disassembly, Design for Repair, materialarme Produktkonzepte, Modularität, Lebensverlängerung durch Design. (3) Herstellung & Wiederaufarbeitung – Zirkuläre Produktion, Remanufacturing, Refurbishment, Prüfung und Klassifizierung, produktionsnahe Kreislaufprozesse.

In-Use-Sphäre. Diese Sphäre umfasst zwei Anwendungsfelder: (1) Nutzung & Betrieb – Zustandsüberwachung, Optimierung der Nutzung, Veränderung der Nutzungsmuster, Nutzungsintensivierung, Mehrfachnutzung, Anreizsysteme, Veränderung der Eigentumsmuster. (2) Aftermarket, Service & Lebenszyklusverlängerung – Reparatur & Wartung, Upgrade & Retrofit, Lebensdauerverlängerung, Second-Life-Nutzung, Rückführungs- & Servicesysteme, Integration & Fokussierung im Geschäftsmodell.

Post-Use-Sphäre. Diese Sphäre umfasst zwei Anwendungsfelder: (1) Recycling & Rückgewinnung – Formen des Recyclings (mechanisch, chemisch, thermisch), Rohstoffrückgewinnung, Umgang mit Sekundärmaterial. (2) Rücknahme, Demontage & Sortierung – Rücknahmesysteme, Demontage, Sortierung, Klassifizierung, Pfadentscheidung.

Querschnitt: Daten, Governance und Service. Diese phasenübergreifende Spalte erfasst: Digitale Produktpässe, Plattformmodelle, Bewertungsmodelle (LCA, KPIs etc.), Interoperabilität (Data Spaces etc.), Datenstandards sowie digitale Funktionen. In diese Spalte wurden zugleich die Indikatoren und Validierungsmöglichkeiten aus AP 3.2.1 integriert.

Konfigurationsmechanik

Eine holistische Perspektive einzelner Anwendungsfälle wird durch die Konfigurationsmechanik ermöglicht, die aus der Methode von (Oks et al. 2018) abgeleitet wurde. Sie besteht aus folgenden Elementen:

- **Ankerpunkte:** Abhängig vom Zweck des zu konfigurierenden CE-Anwendungsfalls wird ein Anwendungsfeld als Ankerpunkt gewählt, der den funktionalen Kern bildet. Ausgehend vom Ankerpunkt werden weitere Anwendungsfelder als Systemkomponenten ausgewählt und markiert.

- Essentielle und optionale Verbindungen: Zwischen den gewählten Anwendungsfeldern werden Material- und Informationsflüsse als Verbindungen modelliert. Durchgezogene Linien und Kreise repräsentieren essentielle Komponenten, gestrichelte Linien optionale. Diese Unterscheidung ermöglicht die Priorisierung innerhalb der Konfiguration.
- Interne und externe Perspektive (I/E): Jedes gewählte Anwendungsfeld wird mit einer Markierung für intern (I), extern (E) oder kombiniert (I/E) versehen. Diese Markierung wird durch die situativen Einflussfaktoren aus dem TOE-Framework informiert: Technologie- und Organisationsfaktoren (T, O) adressieren die interne Perspektive, Umfeldfaktoren (E) die externe. So wird ersichtlich, ob erforderliche Kompetenzen und Infrastruktur intern vorhanden sind oder extern bezogen werden müssen.
- Indikatorenintegration: Den konfigurierten Anwendungsfeldern können Nachhaltigkeits- und Zirkularitätsindikatoren aus dem TBL-basierten Kernset (AP 3.2.1) zugeordnet werden, um Messbarkeit und Validierbarkeit sicherzustellen.

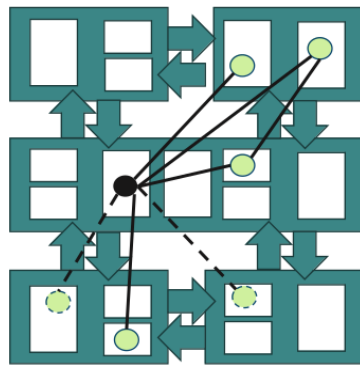


Abbildung 27: Konfigurationsmechanik

Das Ergebnis einer Konfiguration ist ein ganzheitlicher Überblick über die geplante CE-Anwendung mit essenziellen und optionalen Komponenten, deren interner oder externer Verortung, den relevanten Kontextfaktoren und zugeordneten Indikatoren zur Validierung.

Die Lebenszyklusphasen der Taxonomie bilden auf die drei Sphären der Landkarte ab. Die R-Prinzipien und CE-Strategien informieren die Anwendungsfelder innerhalb jeder Sphäre: Designorientierte Strategien (R1, R2) ordnen sich der Pre-Use-Sphäre zu, nutzungsorientierte (R3–R6) der In-Use-Sphäre, materialrückgewinnungsorientierte (R7–R9) der Post-Use-Sphäre. Die digitalen Funktionen aus der Technologie-Dimension fließen in die Querschnittsspalte. Die TOE-Faktoren ergänzen jedes Anwendungsfeld um die I/E-Perspektive. Die TBL-Indikatoren ermöglichen die Zuordnung von Validierungskriterien.

Die CE-Anwendungslandkarte nutzt die CE-Lebenszyklusphasen als Sphären – entsprechend der inhärenten Lebenszyklusorientierung der CE. Weiterhin wird eine funktionale Querschnittssphäre eingeführt, Daten. Die Konfigurationsmechanik (Ankerpunkte, essenzielle/optionale Verbindungen, I/E-Markierung) wurde direkt von (Oks et al. 2018) übernommen und um die TOE-basierte Kontextperspektive sowie die Indikatorenintegration erweitert. Die vierphasige Engineering-Methode von Oks et al. (2018) – (1) Auswahl von Anwendungsfeldern, (2) Konfiguration der Verbindungen, (3) Spezifikation technischer und organisationaler Anforderungen, (4) Evaluation und Iteration – ist auf die CE-Landkarte übertragbar.

4.2 Werkzeugbaukasten Anwendungsvalidierung

Das AP 3.2 wurde von Oktober 2022 bis Dezember 2025 bearbeitet und ist der zweite Teil des im AP 3 entwickelten Werkzeugkastens. Darüber hinaus wurden die Ergebnisse in zwei Unterarbeitspaketen entwickelt. Ziel dieses APs war es, konkrete Anwendungshilfen (Entwicklung und Anpassung von Methoden und Werkzeugen) für Unternehmen und Verbundprojekte zu entwickeln, um sie bei der Einführung und Weiterführung der CE zu unterstützen. Zentrale Ergebnisse sind folgende: Design-Prinzipien für Nachhaltigkeitsindikatoren und Validierungs- und Verifikationstechniken, Archetypen für Nachhaltigkeitsindikatoren, Identifizierung von Best-Practices sowie Reifegradmodell inkl. Vorgehensmodell zur selbstbestimmten Anwendung des Modells.

4.2.1 Konzeptionalisierung Anwendungsvalidierung

Innerhalb des APs 3.2.1 wurden Best Practices erarbeitet, die Unternehmen dazu dienen, effizienter an der automobilen CE teilzunehmen. Hierfür wurden sowohl eine strukturierte Literaturanalyse als auch eine Interviewstudie mit Vertretern der Automobilindustrie durchgeführt. Mittels der Interviewstudie wurden sowohl weitere Maßnahmen erhoben als auch die in der Literatur vorgestellten Herangehensweisen validiert. Diese Datenbasis wurde in drei Iterationen analysiert und konsolidiert, sodass final 33 Best Practices in sechs Dimensionen entwickelt wurden. Die Ergebnisse sind in Abbildung 28 visualisiert.

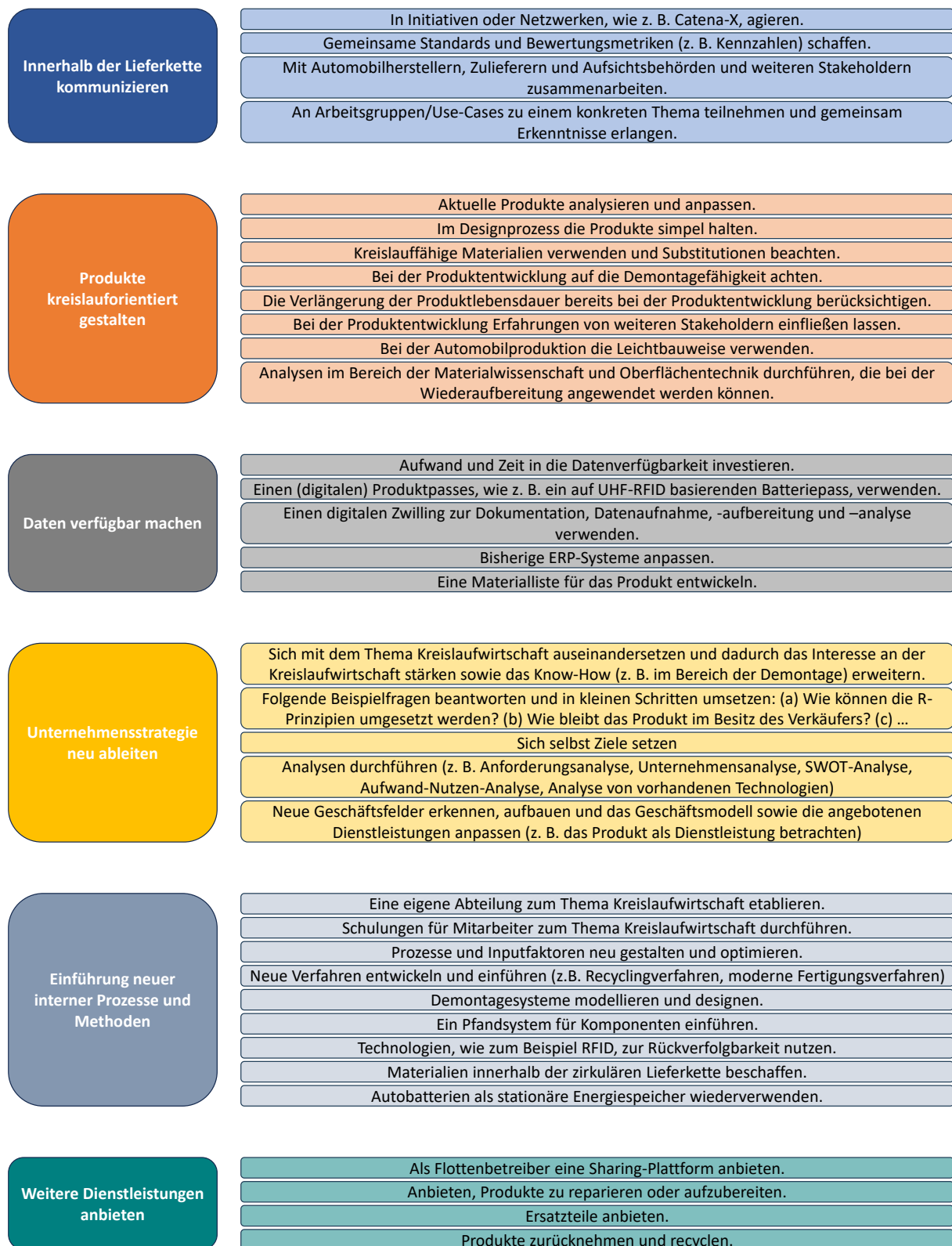


Abbildung 28: Ergebnisse Best-Practices differenziert in sechs Dimensionen

Während der Interviews wurde mehrfach angedeutet, dass es für Unternehmen sinnvoll ist, konkrete Kennzahlen zu entwickeln und neue Bewertungsmetriken zu identifizieren, welche mit Partnern und Lieferanten gemeinsam entwickelt und evaluiert werden sollten. Zweck hinter den KPIs ist die Steuerung und Überwachung der beschlossenen Maßnahmen zur Einführung von Kreislaufwirtschaftsstrategien im Unternehmen.

Aufgrund dessen wurden verschiedene bereits von dem Statistischen Bundesamt aufgeführte Datenbanken veröffentlichter Nachhaltigkeitsindikatoren betrachtet und diese zu einer strukturierten Taxonomie aufgebaut, um Unternehmen Unterstützung bei der Bildung und Identifizierung von wichtigen KPIs anzubieten. Die Datenbanken bilden zum einen nationale Nachhaltigkeitsindikatoren als auch internationale bzw. europäische Indikatoren ab.

Die Datenbasis besteht aus 246 Indikatoren der SDGs, 134 aus dem Indikatorenset der EU-Kommission und 60 der Deutschen Nachhaltigkeitsstrategie. Bei der ersten Iteration wurden 34 Dubletten entfernt, sodass noch eine Datenbasis von 408 Indikatoren übrig war. Bei der zweiten Iteration wurden die ersten 51 Indikatoren analysiert, jeweils drei Indikatoren pro vorgegebene Dimension (1-17 SDGs), woraus folglich Bewertungskriterien abgeleitet wurden. Um die identifizierten Dimensionen zu bestätigen, wurden die restlichen Indikatoren anhand dieser Dimensionen analysiert.

Identifizierte Bewertungskriterien:

- Anzahl zuständiger Behörde
- Zuständige internationale Behörde
- Zeitplan für die Datenherausgabe
- Maßeinheit
- Validierungsmöglichkeit

Die Ausprägungen der fünf identifizierten Dimensionen können der folgenden Taxonomie (Abbildung 28) entnommen werden.

Quelle	SDG						Indikatoren der EU-Kommission						DNS Indikatoren						...																		
Nachhaltigkeitsziel	Bezahlbare und saubere Energie	Frieden, Gerechtigkeit und starke Institutionen	Ge-schlechter-gleichheit	Gesundheit und Wohlergehen	Hochwertige Bildung	Industrie, Innovation und Infrastruktur	Kein Hunger	Leben an Land	Leben unter Wasser	Maßnahmen zum Klimaschutz	Menschenwürdige Arbeit und Wirtschaftswachstum	Nachhaltige Städte und Gemeinden	Nachhaltige Konsum und Produktion	Partnerschaften zur Erreichung der Ziele	Sauberes Wasser und Sanitär-einrichtungen	Weniger Ungleichheiten	...																				
Anzahl zuständiger Behörden	1						2						3						4						5						6						...
Zuständige internationale Behörde	FIES	UN DESA	UNESCO-WIS	FAO	UNEP	OHCHR	IRENA	ILO	IMF	UNAIDS	UNICEF	UN Women	UNFPA	WHO	UNODC	UNSD	Nationale Regierung	ICAO																			
	ITF	OHCHR	UNIDO	OECD	UN-Habitat	UNFCCC	UNSD	UNEP	WB	UNEP-WCMC	IUCN	UNDP	IEA	UNCTAD	UNODA	IPU	ILO	UNFPA																			
						Bundeszentrale für gesundheitliche Aufklärung	Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz	Bundesministerium für Digitales und Verkehr	Bundesministerium für Gesundheit	Bundesministerium für Auswärtiges Amt	Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung	Bundesministerium für Bildung und Forschung	Umweltbundesamt	WHO	WTO	Stifterverband und Wissensstatistik	UNESCO-ED	UNESCO-PSD																			
	ITU	Eurostat	AG Energiebilanzen	Statistisches Bundesamt	AG Erneuerbare Energien Statistik	Bundeszentrale für gesundheitliche Aufklärung	Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz	Bundesministerium für Digitales und Verkehr	Bundesministerium für Gesundheit	Bundesministerium für Auswärtiges Amt	Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung	Bundesministerium für Bildung und Forschung	Umweltbundesamt	WHO	WTO	Stifterverband und Wissensstatistik	UNESCO-ED	UNESCO-PSD																			
Zeitplan der Datenherausgabe	UNESCO-ESD						UNESCO-ESD						IOC-UNESCO						UNHCR						...												
	4x im Jahr	3x im Jahr	2x im Jahr	1x im Jahr	alle 2 Jahre	alle 3 Jahre	alle 4 Jahre	alle 5 Jahre	alle 6 Jahre	alle 7 Jahre	alle 8 Jahre	alle 9 Jahre	alle 10 Jahre	alle 11 Jahre	alle 12 Jahre	alle 13 Jahre	alle 14 Jahre	alle 15 Jahre	alle 16 Jahre	alle 17 Jahre	alle 18 Jahre	alle 19 Jahre	alle 20 Jahre	alle 21 Jahre	alle 22 Jahre	alle 23 Jahre	alle 24 Jahre	alle 25 Jahre	alle 26 Jahre	alle 27 Jahre	alle 28 Jahre	alle 29 Jahre	alle 30 Jahre				
Maßeinheit	Prozentwert						Anzahl						Währung						Gewichtseinheit						Entfernung						...						
Validierung	ja						nein						keine Angabe						keine Angabe						keine Angabe						...						

Abbildung 29: Taxonomie zur Bildung von Nachhaltigkeitsindikatoren

4.2.2 Archetypen von Nachhaltigkeitsindikatoren

Auf Basis der entwickelten Taxonomie zur Beschreibung der Nachhaltigkeitsindikatoren wurden Archetypen erstellt. Archetypen sind Typen, die aufgrund gemeinsamer Eigenschaften und Muster zugeordnet werden. Für Nutzende ist es von Vorteil, dass Archetypen repräsentative Muster angeben, die nachgebildet werden können. Archetypen werden nach Kriterien wie beispielsweise Methoden oder Gestaltung differenziert und zugeordnet.

Der Zweck der im AP 3.2 entwickelten Archetypen zur Nachhaltigkeit besteht darin, eine strukturierte Ordnung und Zusammenhänge bezüglich der von NGOs entwickelten Nachhaltigkeitsindikatoren abzubilden. Die Archetypen zeigen, wie sich die Indikatoren in ihrem Aufbau, ihrem Ziel und ihrer Bedeutung ähneln oder unterscheiden, und dienen somit als Unterstützung. Unternehmen können somit gezielter bessere Nachhaltigkeitsmaßnahmen in ihrem Unternehmen sowie über ihre Unternehmensgrenzen hinaus entwickeln und steuern. Die Archetypen bieten Hilfestellungen dazu, welche nachhaltigen Richtungen und Maßnahmen für Unternehmen der Automobilindustrie am relevantesten sind. Die umgesetzten Nachhaltigkeitsmaßnahmen können direkt in den Nachhaltigkeitsbericht einfließen. Für die Entwicklung der Archetypen war die bereits konstruierte Taxonomie hilfreich, die die übergeordneten Kriterien bzw. Dimensionen für die Zuordnung festlegte.

Mittels einer statistischen Clusteranalyse wurden Archetypen gebildet, die die entsprechenden Merkmale aus der Taxonomie aufweisen. Dieses Vorgehen ist ein fundiertes Verfahren, das in der Wissenschaft häufig zur Bildung von Archetypen eingesetzt wird (siehe AP 1.2).

Als Datenbasis dienten 231 Indikatoren der 17 SDGs, 102 Indikatoren der EU-Kommission und 75 Indikatoren der Deutschen Nachhaltigkeitsstrategie. Die Indikatoren wurden zunächst zusammengefasst und anschließend die Dubletten entfernt. Im zweiten Schritt wurde geprüft, welche der Indikatoren für die Automobilindustrie relevant sind. Die Anzahl der Indikatoren reduzierte sich dementsprechend von 407 auf 47. Für die Bildung und Analyse der Archetypen wurden nicht alle Dimensionen der Taxonomie herangezogen, sondern ausschließlich die folgenden Kriterien: das Konzept der Nachhaltigkeit (ökonomisch, ökologisch, sozial), die Nachhaltigkeitsziele (SDG1–SDG17), die Maßeinheit (Prozentwert, Anzahl, Währung, Gewichtseinheit, anderes) und die Validierung (ja, nein, keine Angabe).

Für jede zutreffende Dimension aus der Taxonomie wurde der binäre Code „1“ vergeben, für jede nicht zutreffende Dimension der binäre Code „0“. Auf dieser Grundlage wurde mithilfe der Statistiksoftware R-Studio eine Clusteranalyse durchgeführt, bei der die Indikatoren anhand ihrer Gemeinsamkeiten und Unterschiede in Cluster verteilt wurden. Um den letzten Schritt zur Archetypisierung zu vervollständigen, wurden die Cluster hinsichtlich ihrer Gemeinsamkeiten und Unterschiede zu den anderen Clustern analysiert. Abschließend ergaben sich sechs Archetypen (siehe Tabelle 17), die die relevantesten Nachhaltigkeitsindikatoren für die Automobilindustrie bilden. Diese wurden aus den 17 internationalen und nationalen Nachhaltigkeitszielen abgeleitet. Die folgende Tabelle 17 präsentiert die wichtigsten Gemeinsamkeiten bezüglich des Ziels, des Zwecks und der Bedeutung für Unternehmen der Archetypen. In der untersten Spalte werden beispielhafte Indikatoren aufgeführt, die den jeweiligen Archetypen zugeordnet wurden.

Tabelle 17: Zusammenfassung der sechs Nachhaltigkeitsarchetypen

	Archetyp 1	Archetyp 2	Archetyp 3	Archetyp 4	Archetyp 5	Archetyp 6
Namensbezeichnung	Umsetzung der Energiewende	Förderung Nachhaltige Produktion	Chancengleichheit am Arbeitsplatz	Schaffung Gleichberechtigung für Personen aus Entwicklungsländern	Arbeitsplatzsicherheit	Betrachtung wirtschaftliche Entwicklung von Entwicklungsländern an der globalen Wirtschaft
Ziel und Zweck	Ursprung: Europäischer Grüner Deal und Pariser Klimaabkommen Ziel: Förderung der Energiewende	Ursprung: Europäischer Grüner Deal und Pariser Klimaabkommen Ziel: Sicherstellung nachhaltiger	Fokus: 100 % soziale Nachhaltigkeit Ziel: Chancengleichheit am Arbeitsplatz, insbesondere für Frauen, und	Fokus: 100 % soziale Nachhaltigkeit Ziel: Chancengleichheit für Menschen aus Entwicklungsländern auf	Fokus: 100 % ökonomische Nachhaltigkeit Ziel: Sicherstellung von Arbeitsplatzsicherheit und	Fokus: auf Indikatoren zur Förderung von Entwicklungsändern für Teilhabe am globalen Handel

	durch Investitionen und Steigerung der Energieproduktivität	Produktion durch Reduktion von Rohstoffverbrauch, CO ₂ -Emissionen und Steigerung der Recyclingquote	Aufbrechen stereotypischer Rollenbilder	dem globalen Arbeitsmarkt	vollständigem Arbeitsschutz	Ziel: Gleichstellung mit Industrieländern und deren Unternehmen
Bedeutung für Unternehmen	Unternehmen müssen bis 2030 Klimaneutralität erreichen Verpflichtung zur Nutzung erneuerbarer Energien	Ziel: Klimaneutralität bis 2030 erreichen Einsatz innovativer Technologien zur Förderung von Nachhaltigkeit und wirtschaftlichem Vorteil	Verbesserung des Unternehmensimages durch Förderung von Frauen und Menschen mit Behinderung Aufbrechen traditioneller Rollen- und Arbeitsmuster	Soziale Nachhaltigkeit wird gleichwertig neben ökologischer Nachhaltigkeit betrachtet Verbesserung des Images durch Unterstützung benachteiligter Unternehmen und Länder	Verbesserung des Unternehmensimages Zufriedene Mitarbeitende steigern die Arbeitsleistung	Aufbau von Partnerschaften mit Unternehmen aus Entwicklungsändern Förderung wirtschaftlicher Zusammenarbeit und Integration in den globalen Handel
Beispielhafte Indikatoren	Energieproduktivität; Primär- und Endenergieverbrauch; Gesamte Treibhausgasemissionen pro Jahr	Beschäftigungsquote; Materieller Fußabdruck; Nationale Recyclingquote	Väterbeteiligung beim Elterngeld; Frauenanteil in Führungspositionen; Verdienstabstand zwischen Frauen und Männern	Anteil der Flüchtlinge an der Bevölkerung, nach Herkunftsland; Versorgung mit grundlegenden Gesundheitsdiensten	Nachhaltige Beschaffung; Tödliche Arbeitsunfälle pro 100 000 Arbeitnehmer; Patentanmeldungen beim Europäischen Patentamt	Anteil der Entwicklungsänder und der am wenigsten entwickelten Länder an den weltweiten Exporten; EU-Einfuhren aus Entwicklungsändern

Archetyp 1: Umsetzung der Energiewende

Dieser Archetyp bezieht sich vollständig auf die Nachhaltigkeitsdimension Ökologie. Das Besondere an diesem Archetyp ist, dass er sich vor allem auf die Energiewende bezieht. Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass die zugehörigen Indikatoren auf ökologische Nachhaltigkeit und Energiewende ausgerichtet sind. Beispielhafte Indikatoren und die Verfolgung ihrer Ziele sind: Ausbau erneuerbarer Energien, Steigerung der Energieeffizienz oder Reduktion von Treibhausgasen.

Insbesondere sind diese Indikatoren mit den Sustainable Development Goals (SDG) 7 und 12 verbunden. Darüber hinaus sind mehrere Indikatoren durch das Pariser Klimaabkommen von 2016 und das darauf aufbauende europäische Maßnahmenpaket „Europäischer Grüner Deal“ entstanden. Verschiedene Maßeinheiten spiegeln unterschiedliche Energie- und Emissionsindikatoren wider, beispielsweise Prozentwerte oder absolute Werte.

Archetyp 2: Nachhaltige Produktion

Im Gegensatz zu Archetyp 1 wird hier auch die ökologische Nachhaltigkeit betrachtet – allerdings aus der Perspektive von Unternehmen. Das Erreichen nachhaltiger ökologischer Ziele bedeutet im Umkehrschluss auch wirtschaftliche Vorteile. Die zu diesem Archetyp zugeordneten Indikatoren spiegeln demnach die ökologische Nachhaltigkeit wider und verfolgen das klare Ziel, den wirtschaftlichen Erhalt und die Optimierung zu gewährleisten. Die Indikatoren stammen aus den SDGs 12 und 9, die insbesondere Innovation und nachhaltige Produktion bzw. Konsum fördern. Die Schwerpunkte dieser Kennzahlen sind unterschiedlich und beziehen sich auf die gesamte Wertschöpfungskette eines Unternehmens. Beispielhafte Indikatoren sind: – Modernisierung der Infrastruktur, Ressourceneffizienz, Innovationsförderung. Darüber hinaus bildet dieser Archetyp die Verbesserung von Unternehmensprodukten ab, indem Indikatoren zur Abfallreduktion sowie zur Erhöhung der Recyclingquote aufgenommen wurden.

Archetyp 3: Chancengleichheit am Arbeitsplatz

Der dritte Archetyp bezieht sich ebenfalls auf das Unternehmensumfeld, deckt jedoch die soziale Dimension ganzheitlich ab. Die Indikatoren basieren auf drei SDGs (SDG 1, SDG 4 und SDG 5). Mit diesem Archetyp werden Chancengleichheit, Machtverhältnisse und Geschlechtertrennung am Arbeitsplatz ermittelt. Die Definitionen der Indikatoren reichen von gängigen Messgrößen (Frauenanteil in Führungspositionen) bis zu sehr spezifischen (Väterbeteiligung beim Elterngeld).

Archetyp 4: Gleichberechtigung in Entwicklungsländern

Neben der sozialen Sicherung des eigenen Unternehmens ist es sinnvoll, den Fokus auch auf die soziale Dimension der global ausgerichteten Lieferketten zu legen. Je tiefer eine Lieferkette aufgebaut ist, desto schwieriger wird es für Unternehmen, die Einhaltung der Menschenrechtsstandards ihrer Lieferanten zu überprüfen. Daher werden Indikatoren aus den sozialen Nachhaltigkeitszielen (SDG 2, SDG 3 und SDG 10) diesem Archetyp zugeordnet. Weitere untergeordnete Ziele dieser Indikatoren sind beispielsweise Gleichheit, Gesundheitsversorgung und Ressourcenzugang.

Archetyp 5: Arbeitsplatzsicherheit

Auch dieser Archetyp verbindet die wirtschaftliche und die soziale Dimension. Er ist jedoch vollständig der ökonomischen Dimension zugeordnet. Sein Ziel ist es, Indikatoren zu bündeln, die den Zielen „menschenwürdige Arbeit, faire Belohnung, sichere Arbeitsbedingungen“ (SDG 6, SDG 8) dienen. Darunter sind Indikatoren zu verstehen, die mit ihrer Kennzahl versuchen, Arbeitsunfälle zu reduzieren oder eine nachhaltige Beschaffung zu fördern.

Archetyp 6: Entwicklungsländer in der globalen Wirtschaft

Der letzte Archetyp vereint alle drei Nachhaltigkeitsdimensionen. Dabei geht es um die Förderung und Unterstützung von Entwicklungsländern, damit diese die gleichen Voraussetzungen wie „reiche“ Länder haben. Die Indikatoren stammen aus der 17. Nachhaltigkeitsdimension. Neben Unternehmen werden auch Regierungen und NGOs aufgefordert, Entwicklungsländer zu unterstützen. Zu den Indikatoren zählen beispielsweise die Stärkung von Partnerschaften, der Zugang zu Finanzmitteln, die Unterstützung beim Wissenstransfer sowie die Förderung von Bildung und Forschung.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Archetypen die wichtigsten Nachhaltigkeitsziele abbilden. Einerseits wird die ökologische Nachhaltigkeit dargestellt und andererseits die soziale Nachhaltigkeit. Letztere ist zudem nochmals unterteilt in die Sicherung der eigenen Mitarbeitenden und die Förderung von Entwicklungsländern und ihren Arbeitskräften. Die Archetypen bieten nicht nur Unternehmen einen groben Überblick darüber, wie Indikatoren aufgebaut sind, welches Ziel sie verfolgen und wie relevant sie sind. Sie bieten auch die Möglichkeit, diese Indikatoren weiterzuentwickeln.

Stakeholder-Anforderungserfassung an Nachhaltigkeitsindikatoren

Um sicherzustellen, dass die entwickelten Nachhaltigkeitsindikatoren den Bedürfnissen, Erwartungen und Prioritäten aller relevanten Stakeholder entsprechen, ist eine systematische und umfassende Anforderungserhebung von zentraler Bedeutung. Vor diesem Hintergrund bestand die Zielsetzung im AP 3.2 darin, die Anforderungen der Stakeholder an Nachhaltigkeitsindikatoren zu erfassen und darauf aufbauend Designprinzipien für die Entwicklung eigener Nachhaltigkeits- und Zirkularitätsindikatoren abzuleiten.

Tabelle 18 beschreibt die verschiedenen Prozessschritte, Aufgaben und Ergebnisse zur Ableitung der Stakeholder-Anforderungserfassung. Der Prozess beginnt mit der Identifikation und Kategorisierung der Stakeholder. Etwa Unternehmen, politische Entscheidungsträger, Forschungseinrichtungen, Kunden oder zivilgesellschaftliche Organisationen – sowie der Analyse ihrer jeweiligen Perspektiven und Einflussbereiche. Anschließend werden ihre Anforderungen, Informationsbedarfe und Bewertungskriterien systematisch erhoben, dokumentiert und inhaltlich ausgewertet.

Auf Grundlage dieser Analyse werden die gewonnenen Erkenntnisse in die Entwicklung und Gestaltung der Indikatoren integriert, um sicherzustellen, dass diese sowohl wissenschaftlich fundiert als auch praxisrelevant sind. Darüber hinaus trägt die aktive Einbindung der Stakeholder zu einer höheren Akzeptanz, Transparenz und Glaubwürdigkeit der Indikatoren bei und fördert deren Anwendung in Entscheidungsprozessen. Eine regelmäßige Überprüfung und Aktualisierung der Anforderungen gewährleisteten schließlich, dass die Indikatoren auch langfristig den sich wandelnden Rahmenbedingungen und Erwartungen gerecht werden.

Tabelle 18: Stakeholder-Anforderungserfassung

Prozessschritt	Aufgabe	Ergebnis
1	Identifizierung der Stakeholder	Interne Stakeholder: Unternehmensleitung, Abteilungsleiter, Mitarbeitende Externe Stakeholder: Kunden, Lieferanten, Investoren, Regulierungsbehörden, NGOs, Gemeinschaften
2	Erhebung der Anforderungen	Interviews: Durchführung von Interviews mit verschiedenen Stakeholder-Gruppen, um ihre Erwartungen und Bedürfnisse zu verstehen. Dokumentenanalysen: Untersuchung von bestehenden Berichten, Richtlinien und Standards, die für die Stakeholder relevant sind.
3	Kategorisierung der Anforderungen	Ökologische Anforderungen: - Reduzierung des CO₂-Fußabdrucks - Schonung natürlicher Ressourcen - Förderung von Recycling und Wiederverwendung - Konsequente Anwendung der R-Prinzipien Soziale Anforderungen: - Verbesserung der Arbeitsbedingungen - Förderung der sozialen Gerechtigkeit - Unterstützung der Gemeinschaftsentwicklung Wirtschaftliche Anforderungen: - Langfristige Rentabilität und Wettbewerbsfähigkeit - Innovationsförderung - Effiziente Ressourcennutzung
4	Analyse und Priorisierung	Relevanzbewertung: Bewertung der Relevanz jeder Anforderung in Bezug auf die strategischen Ziele des Unternehmens und die Nachhaltigkeitsziele. Machbarkeitsanalyse: Untersuchung der technischen und operativen Machbarkeit der Erfüllung jeder Anforderung. Priorisierung: Erstellung einer Prioritätenliste basierend auf Relevanz und Machbarkeit.
5	Integration der Anforderungen	Design der Indikatoren: Entwicklung von Indikatoren, die die priorisierten Anforderungen widerspiegeln. Validierung durch Stakeholder: Präsentation der entwickelten Indikatoren an die Stakeholder zur Überprüfung und Feedback. Anpassung und Feinabstimmung: Anpassung der Indikatoren basierend auf dem erhaltenen Feedback.
6	Dokumentation und Kommunikation	Dokumentation: Erstellung eines umfassenden Anforderungsdokuments, das alle erhobenen Anforderungen und deren Integration in die Indikatoren beschreibt. Kommunikation: Regelmäßige Kommunikation mit den Stakeholdern über den Fortschritt und die Ergebnisse der Indikatorenentwicklung.
7	Kontinuierliche Verbesserung	Feedback-Schleifen: Einrichtung von Mechanismen zur regelmäßigen Erfassung von Feedback der Stakeholder. Anpassung der Indikatoren: Periodische Überprüfung und Anpassung der Indikatoren, um sicherzustellen, dass sie weiterhin den Anforderungen der Stakeholder entsprechen.

Aus den erhobenen Anforderungen wurden im Rahmen einer systematischen Analyse und anschließenden Synthese zehn konkrete Designprinzipien abgeleitet. Diese Prinzipien bilden eine fundierte Grundlage für die Entwicklung und Gestaltung von Nachhaltigkeits- und Zirkularitätsindikatoren. Sie dienen als Leitlinien, um sicherzustellen, dass die Indikatoren sowohl methodisch robust als auch anwendungsorientiert sind und den unterschiedlichen Anforderungen von Wissenschaft, Wirtschaft und Politik gerecht werden.

1. **Transparenz**
 - Indikatoren sollen klar und verständlich formuliert sein, sodass alle Stakeholder den Bewertungsprozess nachvollziehen können.
2. **Relevanz**
 - Die Indikatoren sollen sich auf wesentliche Aspekte der Nachhaltigkeit und Zirkularität konzentrieren, die einen signifikanten Einfluss auf die Umwelt, die Gesellschaft und die Wirtschaft haben.
3. **Messbarkeit**
 - Indikatoren müssen quantitativ oder qualitativ messbar sein, um eine objektive Bewertung und Überwachung zu ermöglichen.
4. **Zuverlässigkeit**

- Die Daten, die zur Berechnung der Indikatoren verwendet werden, sollen aus zuverlässigen und vertrauenswürdigen Quellen stammen.
- 5. **Kohärenz**
 - Indikatoren sollen konsistent und vergleichbar mit bestehenden Standards und Rahmenwerken sein, um eine einheitliche Bewertung zu ermöglichen.
- 6. **Dynamik**
 - Indikatoren sollen flexibel genug sein, um sich an Veränderungen in der Umwelt, der Technologie und der Gesellschaft anzupassen.
- 7. **Inklusivität**
 - Indikatoren sollen alle relevanten Dimensionen der Nachhaltigkeit berücksichtigen, einschließlich ökologischer, sozialer und wirtschaftlicher Aspekte.
- 8. **Praktikabilität**
 - Die Erhebung und Berechnung der Indikatoren sollen praktikabel und kosteneffizient sein, ohne übermäßigen Aufwand oder Ressourcenverbrauch.
- 9. **Aktualität**
 - Die Indikatoren sollen regelmäßig aktualisiert werden, um aktuelle Trends und Entwicklungen abzubilden.
- 10. **Handlungsorientierung**
 - Indikatoren sollen so gestaltet sein, dass sie konkrete Handlungsempfehlungen ableiten lassen und zur Entscheidungsfindung beitragen können

4.2.3 Reifegrad- und Vorgehensmodell zur Ermittlung von Zirkularitätsstufen

Deutsche Automobilunternehmen stehen zunehmend unter Druck, Nachhaltigkeit und CE in ihre bisher linearen Unternehmensstrukturen zu integrieren (Hoppe et al. 2024). Insbesondere KMU sind davon betroffen, denen nur begrenzte Handlungsmöglichkeiten aufgezeigt werden. Ihnen fehlt es an Know-how, finanziellen Mitteln und Fachkräften, um den zirkulären Transformationsprozess zu bewältigen (Kreutzer et al. 2023). Unternehmen müssen ihre Geschäftsmodelle und zugehörigen Prozesse zirkulär gestalten. Dies erfordert den gezielten Einsatz neuer digitaler Technologien und strukturelle Veränderungen, um Zirkularität in sämtlichen Unternehmensbereichen – von der Produktentwicklung über die Beschaffung und die Lieferkette bis hin zur Nutzung und dem EoL-Design – zu verankern (Kreutzer et al. 2023).

Damit ein solcher Wandel systematisch und zielgerichtet erfolgen kann, benötigen Unternehmen geeignete Instrumente, um den Transformationsfortschritt zu erfassen und bewerten zu können. Dabei können Reifegradmodelle nützliche strategische Planungswerkzeuge sein, um den Status Quo einer aktuellen Situation zu ermitteln und entsprechende Anpassungen und Optimierungen vorzunehmen. Becker et al. (2009, S. 249) definieren Reifegradmodelle als Modelle, die eine „Folge von Reifegraden für eine Klasse von Objekten [beinhaltet] und beschreibt dadurch einen antizipierten, gewünschten oder typischen Entwicklungspfad dieser Objekte in aufeinanderfolgenden, diskreten Rangstufen, beginnend mit einem Anfangsstadium bis hin zur vollkommenen Reife.“ Aufgrund der verschiedenen Reifegradstufen nutzen Unternehmen Reifegradmodelle, um stetig den Entwicklungs- und Veränderungsprozess zu messen. Die Einordnung in die Stufen zeigt somit Schwachstellen auf, in denen sich Unternehmen verbessern können. Ein Reifegradmodell ist wie folgt aufgebaut: Es besteht aus einer Anzahl von Stufen mit passenden Entwicklungsbezeichnungen und Beschreibungen. Optional können auch charakteristische Merkmale für die jeweilige Reifegradstufe angegeben werden. (Kreutzer et al. 2023)

Um für die Unternehmen in der Automobilindustrie ein Reifegradmodell zur Messung des Transformationsprozesses innerhalb eines Unternehmens zu entwickeln, wurde hier anlehnend das Vorgehensmodell nach Becker et al. (2009) zur Bestimmung eines Reifegradmodells angewendet. Dieses umfasst folgende fünf Entwicklungsphasen: *Problemdefinition, Vergleich mit existierenden Reifegradmodellen, Festlegung der Entwicklungsstrategie, Iterative Entwicklung, Konzeption der Übertragung und Bewertung.*

Im Rahmen des APs 3.2.2 erfolgte zunächst eine präzise Problemdefinition, die inhaltlich an die zuvor dargestellte Motivation anknüpft. Wie bereits dort erläutert, sind insbesondere KMU der Automobilindustrie vom Wandel zu einer CE betroffen. Dennoch fehlt es bislang an geeigneten Instrumenten, mit denen diese Unternehmen ihren aktuellen Stand systematisch erfassen und ein darauf aufbauendes Anwendungsmodell entwickeln können – von der Zieldefinition bis hin zur Maßnahmenplanung. (Hoppe et al. 2024; Hoppe-Ludwig et al. 2025; Kreutzer et al. 2023). Zunächst

wurde im Rahmen des Arbeitspakts 3.2.2 das Problem genau definiert, wie aus der Motivation bereits hervorgeht. Insbesondere sind KMU in der Automobilindustrie vom Wandel zu einer CE betroffen. Jedoch fehlt es ihnen an richtigen Werkzeugen, die ihren aktuellen Status überprüfen und das zugehörige Anwendungsmodell von der Zielsetzung bis zur Maßnahmenplanung (Hoppe et al. 2024; Hoppe-Ludwig et al. 2025; Kreutzer et al. 2023).

Zur Umsetzung des zweiten Schrittes wurde eine strukturierte Literaturanalyse gemäß dem Vorgehen von Brocke et al. (2009) durchgeführt, um den aktuellen Forschungsstand zu Reifegradmodellen zur Bestimmung des aktuellen Status der Umsetzung der CE in der Automobilindustrie zu ermitteln. Die Recherche wurde in den Literaturdatenbanken Scopus, IEEE Xplore und AIS eLibrary durchgeführt. Nach dem Abzug von Duplikaten liefert der Suchstring 299 Beiträge. Die anschließende Volltextanalyse zeigte, dass lediglich fünf Reifegradmodelle für die Bildung dieses Modells geeignet waren. Folglich konnte geschlossen werden, dass für diesen speziellen Anwendungsfall nur wenige Reifegradmodelle veröffentlicht wurden. Zudem wurde deutlich, dass ein Teil der identifizierten Arbeiten den Schwerpunkt auf die Bewertung der „Readiness“ legte, also auf die Bereitschaft zur Transformation, anstatt auf die Messung des tatsächlichen Transformationsfortschritts. Andere Beiträge befassten sich wiederum mit der Umsetzung einzelner R-Strategien (z. B. Remanufacturing) oder konzentrierten sich auf spezifische Geschäftsmodelle. Diese Heterogenität zu den Reifegradmodellen ist auch den Autoren Kreutzer et al. (2023) bei ihrer strukturierten Literaturrecherche aufgefallen.

Im dritten Schritt wurde die Entwicklungsstrategie des Reifegradmodells festgelegt. Zur Erstellung des Reifegradmodells dienten verschiedene wissenschaftliche Ergebnisse als Hilfestellung. Erstens wurden fünf aus der Literaturanalyse stammende Reifegradmodelle (z. B.: Brendzel-Skowera (2021), Dell'Ambrogio et al., Sacco et al. (2021), Saari et al. (2024)) genutzt. Zweitens wurde die *Fähigkeitsmap* von Hoppe et al. (2024) als weiterer Baustein herangezogen. Diese Map zeigt für die zirkuläre Organisationstransformation relevante dynamische Fähigkeiten auf und ordnet sie gemäß Teece (2020) anschließend in drei Abfolgen – Sensing, Seizing und Transforming – ein. Ein weiterer Grund für die Nutzung dieser *Fähigkeitsmap* war der Bezug zur Automobilindustrie, wodurch das Reifegradmodell stärker in den Fokus dieser Branche rückt. Drittens diente die von Porter entwickelte Wertschöpfungskette als theoretische Linse. Sie stellt die Abläufe eines Unternehmens dar, die notwendig sind, um das „Wertversprechen“ seines Geschäftsmodells an die Kunden zu liefern. Das Werkzeug dient dabei insbesondere als Managementinstrument, um innerhalb der Wertschöpfungskette eines Unternehmens Wettbewerbsvorteile zu identifizieren. Darüber hinaus kann es neben der Analyse auch für die organisatorische Ausrichtung oder den strukturierten Planungsprozess genutzt werden. Das Ziel des Reifegradmodells besteht darin, den Transformationsprozess eines Unternehmens vom linearen Wirtschaftsmodell hin zum kreislauffähigen Wirtschaftsmodell zu messen. Da die Wertschöpfungskette von Porter die im Unternehmen festgelegten Bereiche abbildet, ist es sinnvoll, dieses Modell als Basis zur Einordnung der aus der Literatur identifizierten Charakteristika einzelner Stufen zu verwenden.

Der zirkuläre Transformationsprozess eines Unternehmens wird sowohl entlang der fünf Primäraktivitäten (Eingangslogistik, Produktion, Vertrieb und Marketing, Ausgangslogistik, Services) als auch der vier Unterstützungsaktivitäten (Human Resources, Beschaffung, technologische Entwicklung, Unternehmensinfrastruktur) erfasst. Das Reifegradmodell differenziert fünf Stufen des Veränderungsprozesses: Linearität, zirkuläre Pilotierung, systematisches Ressourcenmanagement, zirkuläre Pilotierung, systematisches Ressourcenmanagement, zirkuläres Denken und Zirkularität. Die Definition dieser Stufen orientiert sich an den Ausführungen von (Acerbi et al. 2021). Die Abstufungen veranschaulichen den Transformationsverlauf von einem linearen Geschäftsmodell hin zu einer vollständigen Zirkularität.

In der folgenden Abbildung (s. Abbildung 30) wird das Endergebnis des Reifegradmodells präsentiert.

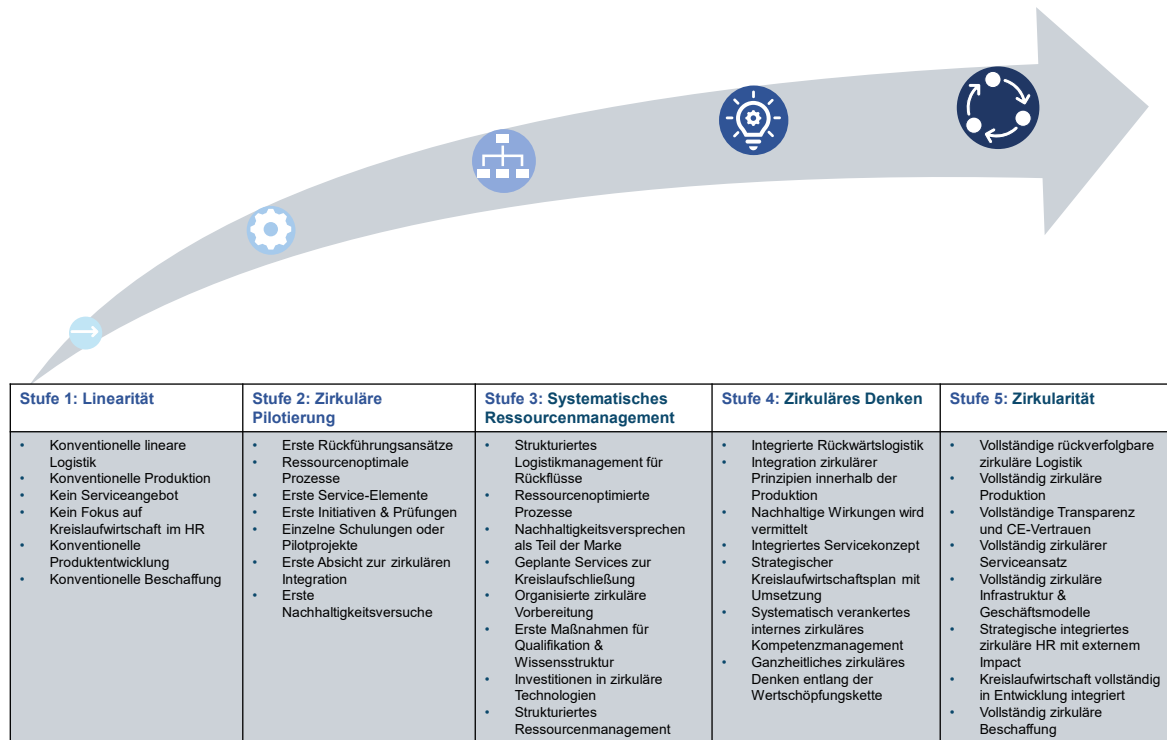


Abbildung 30: Bewertung des Transformationsprozesses zur Zirkularität entlang der Wertschöpfungskette

Im Folgenden werden die einzelnen Reifegradstufen und ihre Ausprägungen innerhalb der Wertschöpfungskette kurz erklärt:

1. Linearität:

Die Wertschöpfung folgt dem klassischen „Nehmen-Herstellen-Wegwerfen“-Paradigma. Unternehmen fokussieren sich auf Kosten, Effizienz und Output. Rückführungsprozesse, Ressourcenschonung und zirkuläre Prinzipien werden weder in Logistik, Produktion, Marketing, Services, HR, Technischer Entwicklung noch in der Beschaffung berücksichtigt. Nachhaltigkeit spielt keine Rolle.

2. Zirkuläre Pilotierung:

Erste isolierte Initiativen zur CE entstehen wie Pilotprojekte für Rücknahme, Recycling oder Reparaturservices. Nachhaltigkeit wird punktuell kommuniziert und erste zirkuläre Elemente in Beschaffung, Produktion, Marketing, Services und HR getestet. Die Aktivitäten sind dabei experimentell und noch nicht systematisch in die unternehmensweite Wertschöpfung integriert.

3. Systematisches Ressourcenmanagement:

Unternehmen implementieren strukturierte Prozesse zur Ressourcenschonung, zum Recycling, zu den Rückführungen sowie zur Lebenszyklusverlängerung. Die Prinzipien der CE werden zunehmend in Produktion, Marketing, Services, Technischer Entwicklung, HR und Beschaffung verankert. Erste digitale Unterstützungen und Kennzahlen zur Ressourcennutzung werden eingeführt.

4. Zirkuläres Denken:

Die CE ist ein integraler Bestandteil der Wertschöpfung und Unternehmensstrategie. Rückführungsprozesse, R-Strategien (Repair, Refurbish, Remanufacturing) und nachhaltige Lieferketten sind systematisch implementiert. Marketing, HR, Services und Technische Entwicklung fördern aktiv CE und nachhaltige Markenidentität.

5. Zirkularität:

Die gesamte Wertschöpfungskette ist vollständig zirkulär ausgerichtet. Alle Material- und Energieflüsse sind digital erfasst und in Echtzeit nachverfolgbar. Die CE ist operativ, strategisch und kulturell verankert. Transparenz, digitale Produktpässe, CE-Kennzahlen, nachhaltige Beschaffung, Product-as-a-Service-Modelle und kontinuierliche Optimierung über Lebenszyklen hinweg sind etabliert.

Allerdings reicht das reine Reifegradmodell nicht aus, um den Transformationsprozess hin zum vollständig zirkulären Unternehmen voranzutreiben. Oft fehlen bei bestehenden Reifegradmodellen konkrete Anwendungsleitfäden. In den Modellen werden zwar die einzelnen Stufen beschrieben, es werden jedoch kaum Hinweise gegeben, wie Anwender diese tatsächlich messen oder operationalisieren können. In der Regel erfolgt die Bewertung auf Basis einer Selbsteinschätzung. (Kreutzer et al. 2023)

Vor diesem Hintergrund wurde aufbauend auf dem vorgestellten Reifegradmodell ein ergänzendes Vorgehensmodell zur eigenständigen Evaluation entwickelt. Dieses ermöglicht Unternehmen die Einordnung in die jeweiligen Reifegradstufen. Das Modell gliedert sich in fünf Schritte, die kontinuierlich durchgeführt werden, um Unternehmen während des gesamten Transformationsprozesses bis zur vollständigen Integration der CE zu begleiten. Das Ziel des Vorgehensmodells ist es, dass Unternehmen ihren Transformationsfortschritt eigenständig überwachen und bewerten können. Die einzelnen Schritte sind in der folgenden Abbildung 31 dargestellt. Zudem werden die einzelnen Schritte kurz beschrieben.

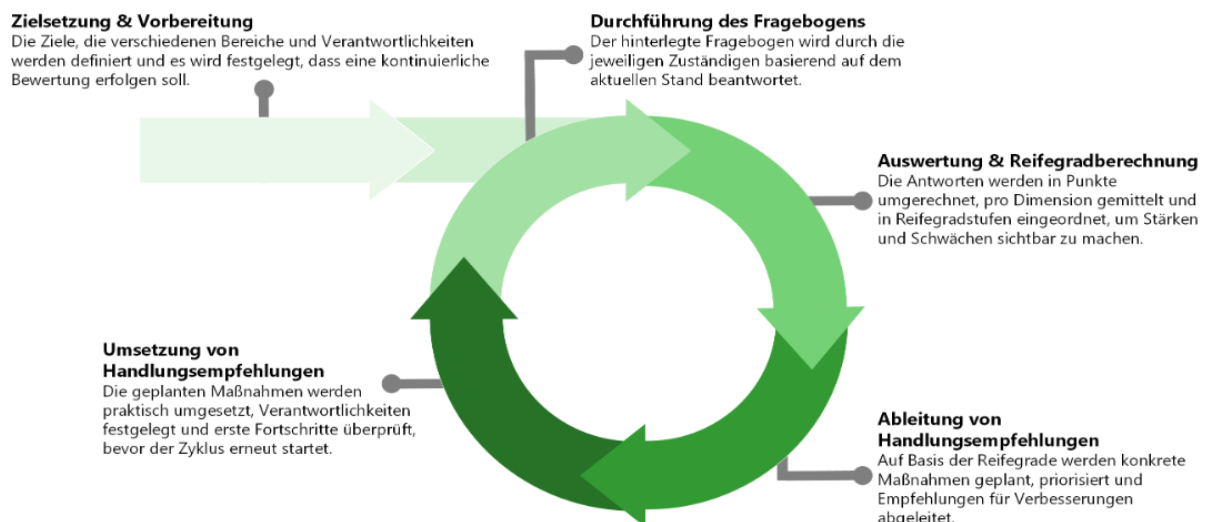


Abbildung 31: Vorgehensmodell zur kontinuierlichen Anwendung des Reifegradmodells

Im ersten Schritt treffen Unternehmen die bewusste Entscheidung, den Transformationsprozess aktiv zu durchlaufen und eine Reifegradbestimmung durchzuführen. Dazu müssen zunächst Ziele, Verantwortlichkeiten und relevante Unternehmensbereiche klar definiert werden, um eindeutige und nachvollziehbare Prozesse etablieren zu können. Um den aktuellen Status des Unternehmens zu erfassen, bietet sich im zweiten Schritt ein Fragebogen an, der die aktuelle Reifegradstufe ermittelt. Im Projekt DIONA wurde ein solcher Fragebogen auf Basis von (Garza-Reyes et al. 2019) entwickelt. Das Instrument wurde ausgewählt, da es auf KMUs zugeschnitten ist, den Fokus auf Zirkularität legt und benutzerfreundlich gestaltet ist. In ihrer Recherche identifizierten die Autoren, dass bestehende Messinstrumente zur CE häufig nicht auf KMUs spezialisiert und unvollständig sind.

Für das hier entworfene Reifegradmodell wurden für jede Aktivität innerhalb von Porters Wertschöpfungskette vier bis fünf Fragen formuliert, sodass insgesamt 39 Fragen entstanden. Eine beispielhafte Frage für den Bereich *Logistik* ist, ob es Rückführungsprozesse für Produkte und Materialien gibt. Aus dem Bereich *Produktion* wird konkret nach den R-Strategien gefragt, ob diese bereits in die Prozesse integriert sind. Im Bereich der *Technische Entwicklung* wird beispielsweise nach der interdisziplinären Zusammenarbeit in der Entwicklung und der Ausrichtung der Produktentwicklung auf die CE gefragt. Die Antworten können mit „Ja“, „Teilweise“ oder „Nein“ angegeben werden. Die Punktevergabe erfolgt wie folgt: „Ja“ entspricht einem Punkt, „teilweise“ 0,5 Punkten und „Nein“ 0 Punkten. Ein „Ja“ wird vergeben, wenn das Unternehmen die beschriebene

Tätigkeit zu 70–100 % umgesetzt. Ein „Teilweise“ wird vergeben, wenn die Tätigkeit zu 1–70 % umgesetzt wird. Ein „Nein“ wird vergeben, wenn die Tätigkeit nicht umgesetzt oder berücksichtigt wird.

Anhand der vergebenen Punkte werden sowohl Prozentwerte für einzelne Unternehmensaktivitäten (z. B. Logistik, Produktion, Unternehmensinfrastruktur, Personalentwicklung, technische Entwicklung) als auch ein Gesamtwert berechnet. Die Reifegradstufen werden in Intervallen von je 20 Prozentpunkten differenziert, wie in der folgenden Tabelle (s. Tabelle 19) dargestellt. Dieses Vorgehen ermöglicht es Unternehmen, den aktuellen Stand ihrer Transformation systematisch zu erfassen und gezielte Maßnahmen zur Weiterentwicklung abzuleiten.

Tabelle 19: Darstellung der Reifegradstufen und ihre dazugehörigen Prozentwerte

Prozentwert	Reifegradstufe
0% - 20 %	Linearität
21% - 40%	Zirkuläre Pilotierung
41% - 60%	Systematisches Ressourcenmanagement
61% - 80 %	Zirkuläres Denken
81 % - 100%	Zirkularität

Nachdem im dritten Schritt die Auswertung und Reifegradberechnung durchgeführt wurden, werden im vierten Schritt konkrete Maßnahmen abgeleitet und definiert. Diese müssen durch das strategische Management priorisiert werden, abhängig von den identifizierten Schwächen und Handlungsbedarfen innerhalb der Wertschöpfungskette. Im Anschluss an die Priorisierung folgt die Planungs- und Umsetzungsphase als letzter Schritt. Dabei unterstützen die im Projekt DIONA entwickelten Werkzeuge und Handlungsempfehlungen, etwa für Geschäftsmodell- oder Prozessinnovationen. Das im AP 1.2 entwickelte Smart Circular Canvas bietet beispielsweise die Möglichkeit, datengetriebene zirkuläre Geschäftsmodelle zu analysieren und zu entwickeln.

Da es sich beim Vorgehensmodell um eine kontinuierliche Abfolge von vordefinierten Schritten handelt, wird nach der erfolgreichen Umsetzung der Maßnahmen wieder mit dem ersten Schritt des Modells begonnen.

Abschließend ist festzuhalten, dass das Vorgehens- und das Reifegradmodell zwei zentrale Werkzeuge zur Umsetzung der CE sind. Sie begleiten den Unternehmenswandel innerhalb der Wertschöpfungskette von der Linearität zur vollständigen Zirkularität. Die Evaluierungsfragen sind einfach und benutzerfreundlich gestaltet. Nach der Einordnung in eine zirkuläre Reifegradstufe können Unternehmen gezielt Maßnahmen ergreifen, um den Reifegrad weiter in Richtung vollständiger CE zu erhöhen. Ein weiterer Vorteil des hier vorgestellten Reifegradmodells ist, dass auch die einzelnen Aktivitäten der Wertschöpfungskette überprüft werden können. Dadurch können Unternehmen innerhalb der Wertschöpfungskette in den einzelnen Aktivitäten auch Schwachstellen ermitteln.

4.2.4 Design-Prinzipien für Validierungs- und Verifikationstechniken

Im Rahmen des APs 3.2 wurden Design-Prinzipien für Verifikations- und Validierungstechniken (V&V-Techniken) entwickelt, die eine zuverlässige Anwendung von Technologien in unterschiedlichen Bereichen der CE ermöglichen sollen. Ziel der Nutzung von V&V-Techniken ist es, Vertrauen in die Nutzung von Prozessen, Anwendungen und Software zu schaffen sowie höhere Sicherheit bei der Umstellung von Prozessen zu gewährleisten, insbesondere im Kontext der Digitalisierung.

Verifikation und Validierung sind essenziell, um die Qualität und Zuverlässigkeit von Systemen oder Produkten sicherzustellen. Während Verifikation überprüft, ob ein Produkt oder System korrekt implementiert wurde („Bauen wir das System richtig?“), stellt die Validierung sicher, dass das richtige System für die vorliegende Situation entwickelt wird („Bauen wir das richtige System?“) (Sargent 2015).

Die Entwicklung und Anwendung von Verifikations- und Validierungstechniken (V&V-Techniken) haben sich in den Bereichen der Softwareentwicklung und Simulation bereits als etablierte Werkzeuge zur Sicherstellung von Qualität und Zuverlässigkeit bewährt (Gutenschwager et al. 2017). Dennoch zeigt sich, dass diese Techniken bislang nur unzureichend an die spezifischen Herausforderungen der Transformation hin zu einer CE angepasst wurden. Die zunehmende Bedeutung der Digitalisierung

sowie die Komplexität moderner Produktions- und Logistiksysteme erfordern jedoch eine Weiterentwicklung dieser Methoden, um ihre Anwendbarkeit auf neue Szenarien zu erweitern. Insbesondere Simulationen bieten dabei vielversprechende Möglichkeiten: Sie erlauben es Unternehmen, innovative Ansätze risikoarm zu testen, bestehende Systeme gezielt zu optimieren oder durch Echtzeitüberwachung sowohl auf Maschinenebene als auch entlang der gesamten Lieferkette effizientere Prozesse zu gestalten (Mares et al. 2023; Diaz et al. 2021). In diesem Kontext ist die Adaption von V&V-Techniken für unterschiedliche Bereiche der CE unerlässlich, sei es zur Gewährleistung höherer Sicherheit bei Prozessumstellungen oder im Rahmen digitaler Transformationsprozesse. Diese Überlegungen bildeten die Ausgangsbasis für die Entwicklung spezifischer Design-Prinzipien, die im Folgenden näher erläutert werden.

Die Entwicklung der Design-Prinzipien als Richtlinie zur Entwicklung und Verbesserung von V&V-Techniken erfolgte angelehnt an den Design Science Research Ansatz nach vom Brocke et al. (2020). Dabei wurden iterative Zyklen durchlaufen, um sowohl theoretische als auch praktische Erkenntnisse zu gewinnen und die Ergebnisse stetig zu verbessern und zu schärfen.

Als Ausgangspunkt diente eine umfassende Literaturrecherche, die bestehende Ansätze und Methoden im Bereich der V&V-Techniken systematisch analysierte und bewertete. Insbesondere die Arbeiten von renommierten Forschenden wie Rabe et al. (2008), Sargent (2015), Balci (2007) sowie weiteren Experten wie Sankararaman und Mahadevan (2015), Kleijnen (1995) und Rodriguez et al. (2019) lieferten wertvolle theoretische Grundlagen für das Teilarbeitspaket. Methodisch wurde dabei das Vorgehen nach vom Brocke et al. (2020) berücksichtigt, um eine strukturierte Herangehensweise zu gewährleisten. Diese intensive Auseinandersetzung mit dem aktuellen Forschungsstand bildete die Basis für die Ableitung der spezifischen Design-Prinzipien und deren Anpassung an die Anforderungen einer nachhaltigen CE.

Im Rahmen des APs wurde ein umfassender Fragebogen entwickelt, um Einblicke in die Anwendung und Wahrnehmung von V&V-Techniken in Unternehmen zu gewinnen. Der Fragebogen ist in Tabelle 20 abgebildet und gliedert sich in verschiedene Themenbereiche, darunter V&V im Unternehmenskontext, spezifische Techniken, Ressourcenbedarf, Dokumentation, Herausforderungen sowie Wünsche der Unternehmen. Zur Bewertung kam eine Likert-Skala von 1 bis 5 zum Einsatz, die eine differenzierte Einschätzung der Teilnehmenden ermöglichen sollte. Zusätzlich wurden geschlossene und offene Fragen integriert, um sowohl quantitative als auch qualitative Daten zu erfassen. Als Umfragetool wurde LimeSurvey verwendet.

Tabelle 20: Fragebogen zur Datensammlung bezüglich der Nutzung und Einschätzung von V&V in Unternehmen.

Kontext	Frage	Einordnung
V&V im Unternehmen	Wie würden Sie durchschnittlich den Aufwand von V&V im Gesamtprojekt einordnen?	1-5
	Inwieweit gibt es in Ihrem Unternehmen standardisierte Prozesse zu V&V?	1-5
	Inwieweit gibt es in Ihrem Unternehmen die Rolle des Verifikationsteams als eigenständige Instanz?	Ja/ Nein
	Wie schätzen Sie die Wertschätzung von V&V im Unternehmen ein?	1-5
V&V-Techniken	Wie wichtig ordnen Sie in Ihrem Unternehmen die V&V-Technik der Begutachtung ein? <i>Kurzerklärung: Überprüfung mittels Gesprächs mit Management und Auftraggeber.</i>	1-5
	Wie wichtig ordnen Sie in Ihrem Unternehmen die V&V-Technik des Dimensionstests ein? <i>Kurzerklärung: Überprüfung der genutzten Formeln durch Nachrechnung mit den verwendeten Dimensionen.</i>	1-5
	Wie wichtig ordnen Sie in Ihrem Unternehmen die V&V-Technik des Schreibtischtests ein? <i>Kurzerklärung: Eigenständige Selbstüberprüfung auf Vollständigkeit, Korrektheit, Konsistenz und Eindeutigkeit.</i>	1-5
	Wie wichtig ordnen Sie in Ihrem Unternehmen die V&V-Technik des Tests der internen Validität ein? <i>Kurzerklärung: Überprüfung des Systemverhaltens bei gleichen Parametern, aber unterschiedlichen Startwerten.</i>	1-5
	Wie wichtig ordnen Sie in Ihrem Unternehmen die V&V-Technik der Tests von Teilmodellen ein? <i>Kurzerklärung: Überprüfung des korrekten Systemverhalten von Teilmodellen.</i>	1-5
	Wie wichtig ordnen Sie in Ihrem Unternehmen die V&V-Technik des Ursache-Wirkungs-Graphen ein? <i>Kurzerklärung: Durchführung einer systematischen Analyse, um iterativ die Problemursache mit der entsprechenden Wirkung festzustellen.</i>	1-5

	Welche weiteren V&V-Techniken nutzen Sie?	Offen
Ressourcen	Mit welcher Wichtigkeit würden Sie den Faktor Mensch im Rahmen der Bearbeitung von V&V einordnen?	1-5
	Mit welcher Wichtigkeit würden Sie den Faktor Sensorik im Rahmen der Bearbeitung von V&V einordnen?	1-5
	Mit welcher Wichtigkeit würden Sie den Faktor Daten im Rahmen der Bearbeitung von V&V einordnen?	1-5
Dokumentation	Wie wichtig ordnen Sie die Dokumentation für V&V ein?	1-5
	Wie wichtig ist in Ihrem Unternehmen die digitale Dokumentation ?	1-5
	Welche Verfahren bzw. welche Software nutzen Sie zur Dokumentation?	Offen
Herausforderungen	Inwieweit sehen Sie den Faktor Zeit als Herausforderung zur Bearbeitung von V&V?	1-5
	Inwieweit sehen Sie den Faktor Kosten als Herausforderung zur Bearbeitung von V&V?	1-5
	Inwieweit sehen Sie den Faktor des menschlichen Verhaltens als Herausforderung zur Bearbeitung von V&V?	1-5
	Inwieweit sehen Sie den Faktor der unternehmerisch gesammelten Erfahrungen als Herausforderung zur Bearbeitung von V&V?	1-5
	Welche weiteren Herausforderungen sehen Sie in Bezug auf die Anwendung von V&V?	Offen
Wünsche	Wie wichtig wäre Ihnen ein domänenübergreifender Leitfaden für V&V?	1-5
	Wie wichtig ist Ihnen eine Automatisierbarkeit in V&V?	1-5
	Wie wichtig wären Methodiken für die Auswahl von V&V-Techniken für Ihre Projekte?	1-5
	Welche Unterstützung (Softwarelösungen, Standardisierungen etc.) würde den Einsatz von V&V in Ihrem Unternehmen erhöhen?	Offen
Unternehmenskontext	Ordnen Sie die Mitarbeiterzahl Ihres Unternehmens ein?	1-100 / 100-500 / 500-1000 / 1000+
	In welcher Industriedomäne ist Ihr Unternehmen hauptsächlich tätig?	Offen
	Wird in Ihrem Unternehmen überwiegend mit klassischen oder agilen Arbeitsmethoden gearbeitet?	Offen

Trotz einer breit angelegten Verteilung des Fragebogens über verschiedene Kanäle (Direktansprache, E-Mailverteiler, Social Media) blieb die Rücklaufquote gering, was eine umfassende quantitative Auswertung verhinderte. Die erhaltenen Antworten lieferten jedoch wertvolle qualitative Erkenntnisse und bildeten zusammen mit Erkenntnissen aus der Literatur die Basis für die Ableitung der Design-Prinzipien für V&V-Techniken.

Zu den abgeleiteten Design-Prinzipien gehört zunächst die *Nachvollziehbarkeit* (Design Prinzip 1) der eingesetzten Techniken. Diese müssen so gestaltet sein, dass sie sowohl von technischen Experten als auch von Entscheidungsträgern auf Managementebene verstanden werden können. Eng damit verbunden ist das Prinzip der *Dokumentation* (Design Prinzip 2), das eine strukturierte digitale Erfassung aller relevanten Informationen fordert. Eine solche Dokumentation bildet nicht nur die Grundlage für langfristige Qualitätssicherung, sondern erleichtert auch zukünftige Anpassungen und Weiterentwicklungen. Dies ermöglicht Rückverfolgbarkeit und Transparenz, was insbesondere bei komplexen Prozessen entscheidend ist.

Die *Kombination verschiedener V&V-Techniken* (Design Prinzip 3) stellt ein weiteres zentrales Element dar. Durch den Einsatz multipler Ansätze können unterschiedliche Anforderungen gezielt adressiert werden, etwa durch den Einsatz subjektiver Methoden wie Expertenbewertungen sowie objektiverer Verfahren basierend auf (empirischen) Daten. Dieses Zusammenspiel wird zusätzlich durch das Prinzip der *Phasenbewussten Anwendbarkeit* (Design Prinzip 4) gestärkt: Es legt fest, dass V&V-Techniken entweder phasenübergreifend oder spezifisch für bestimmte Projektabschnitte nutzbar sein sollten.

Ein weiterer Fokus liegt auf der *Reproduzierbarkeit* (Design Prinzip 5), da Ergebnisse unter gleichen Bedingungen konsistent reproduzierbar sein sollten, um Vertrauen in die Zuverlässigkeit eines Systems oder Prozesses zu schaffen. Zudem wurde das Prinzip der *Anpassung an die Domäne* (Design Prinzip 6) entwickelt: Angesichts spezifischer Herausforderungen in Bereichen wie Produktion oder Logistik müssen V&V-Techniken flexibel genug sein, um dynamisches Systemverhalten und hohe Komplexität abzubilden. Schließlich berücksichtigt das letzte Design-Prinzip die *Berücksichtigung der Datenlage* (Design Prinzip 7); es fordert Mechanismen zur effektiven Nutzung unterschiedlich verfügbarer Datenmengen als Grundlage fundierter Entscheidungen.

Die vorgestellten Prinzipien tragen dazu bei, die zentralen Aufgaben sowohl der Verifikation als auch der Validierung systematisch umzusetzen und dabei sowohl technische Präzision als auch betriebliche Anforderungen miteinander zu vereinen.

Insbesondere im Hinblick auf den nachhaltigen Umbau von Produktionsprozessen innerhalb einer CE bieten diese Prinzipien erhebliche Vorteile. Ein Beispiel hierfür ist die Implementierung ressourcenschonender Fertigungsmethoden unter Berücksichtigung dynamischer Systemanforderungen wie schwankender Materialflüsse oder variierender Nachfragebedingungen. Die Kombination aus reproduzierbaren Ergebnissen und domänenspezifischer Anpassungsfähigkeit erlaubt es Unternehmen, innovative Prozesse sicher einzuführen und gleichzeitig Vertrauen in deren Funktionalität aufzubauen.

Zusammenfassend leisten die entwickelten Design-Prinzipien einen wesentlichen Beitrag zur Optimierung von Verifikations- und Validierungsprozessen im Kontext einer nachhaltigen Transformation hin zur CE. Sie fördern nicht nur Sicherheit und Effizienz bei Prozessumstellungen aufgrund zunehmender Digitalisierung; vielmehr schaffen sie auch eine Grundlage für langfristige Weiterentwicklungen von V&V-Techniken, indem sie Klarheit über Prozesse schaffen sowie ihre Akzeptanz bei verschiedenen Stakeholdern erhöhen.

Trotz der bedeutenden Fortschritte, die im Rahmen des APs erzielt wurden, traten auch einige Herausforderungen zutage, die eine umfassende Implementierung von Verifikations- und Validierungstechniken in der Praxis erschweren können. Zu den zentralen Hindernissen zählen insbesondere zeitliche und finanzielle Ressourcen, die häufig begrenzt sind und somit den Einsatz aufwendiger V&V-Prozesse behindern. Darüber hinaus wurde deutlich, dass menschliches Verhalten sowie eine oftmals unzureichende Erfahrung mit V&V-Techniken in Unternehmen zusätzliche Barrieren darstellen können.

Nichtsdestotrotz hat das AP entscheidende Grundlagen geschaffen, die sowohl theoretische als auch praktische Ansätze für eine verbesserte Anwendung von V&V-Techniken liefern. Diese Erkenntnisse bieten ein solides Fundament für zukünftige Forschungsarbeiten, um bestehende Herausforderungen gezielt anzugehen und die Weiterentwicklung von Methoden zur Unterstützung der Transformation hin zu einer nachhaltigen CE voranzutreiben.

Ergänzung der Anwendungsfälle um Validierungsverfahren und Nachhaltigkeits- & Zirkularitätsindikatoren

Im Rahmen von AP 3.2.1 wurde ein konsolidiertes Indikatorenset zur Bewertung von Nachhaltigkeit und Zirkularität in der Automobilindustrie entwickelt. Ausgangspunkt bildeten zwei unabhängige Indikatorensammlungen: eine literaturbasierte Sammlung, die mittels eines systematischen Reviews in Scopus aufgebaut wurde (169 Nachhaltigkeits- und 110 Zirkularitätsindikatoren), sowie eine rahmenwerksbasierte Sammlung aus der Archetypenentwicklung. Da beide Sammlungen inkompatible Kategorisierungen verwendeten, wurde die Triple-Bottom-Line (TBL) mit den Säulen Ökologie, Ökonomie und Soziales als gemeinsamer Ordnungsrahmen gewählt und durch 16 thematische Unterkategorien differenziert.

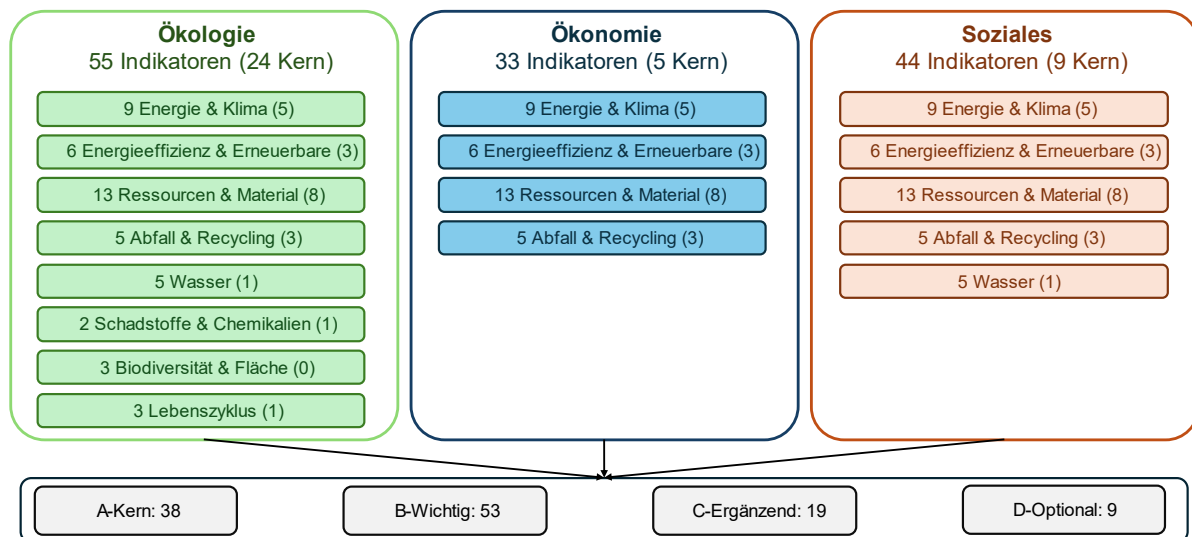


Abbildung 32: Zuordnung Indikatoren anhand der TBL

Nach Zusammenführung, Harmonisierung und Bereinigung von 17 Duplikaten verblieben 115 automobil-relevante Indikatoren, die anhand der Kriterien Messbarkeit und strategische Bedeutung (jeweils 1–5) priorisiert wurden. Das resultierende Kernset (Prioritätsstufe A, Score ≥ 9) umfasst 38 Indikatoren mit einer deutlichen Dominanz der ökologischen Säule (24 Indikatoren), gefolgt von sozialen (9) und ökonomischen Kenngrößen (5). Die Unterkategorie Ressourcen und Materialeffizienz stellt mit acht Kernindikatoren die größte Einzelgruppe dar, was die zentrale Bedeutung von Materialkreisläufen für die zirkuläre Automobilproduktion unterstreicht.

Tabelle 21: Finales Indikatorenset

TBL	Indikator (DE)	Vorgeschlagene Messgröße
Soziales	Arbeitsunfälle (tödlich/nicht-tödlich)	Anzahl / 100.000 MA
Soziales	Durchschnittlicher Stundenverdienst	€/Stunde
Soziales	Tarifbindung	% / Anzahl Tarife
Soziales	Ausbildungsquote	% / Anzahl Azubis
Soziales	Ausgaben für Mitarbeiterentwicklung	€/MA oder % vom Umsatz
Soziales	Krankheitsrate	%
Soziales	Gender Pay Gap	%
Soziales	Frauen in Führungspositionen	%
Soziales	Diversität in Vorstandspositionen	% w/m/d
Soziales	Geschlechtsspezifische Beschäftigungslücke	Prozentpunkte
Soziales	Väterbeteiligung Elterngeld	%
Soziales	Gleichstellungsregelungen im CoC	ja/nein + Reifegrad
Ökologie	Nationale Recyclingquote	% / t recycelt
Ökologie	Recyclingquoten spezifischer Abfallströme	% je Fraktion
Ökologie	Abfallaufkommen (ohne mineral. Abfälle)	t / Jahr
Ökologie	Netto-Treibhausgasemissionen	t CO ₂ -eq / Jahr
Ökologie	Ø CO ₂ -Emissionen pro km neuer PKW	g CO ₂ /km (WLTP)
Ökologie	CO ₂ -Emissionen pro Wertschöpfungseinheit	kg CO ₂ /€ Wertschöpfung
Ökologie	Treibhausgaseffekt (Zirkularität)	t CO ₂ -eq vermieden
Ökologie	Schadstoffemissionen der Fahrzeuge	mg NOx/km, mg PM/km
Ökologie	Anteil erneuerbarer Energien am Endenergieverbrauch	%

Ökologie	Energieintensität (Primärenergie/BIP)	MJ/€ Wertschöpfung
Ökologie	Primär- und Endenergieverbrauch	MJ / Jahr
Ökologie	Tatsächliche Nutzungs-/Lebensdauer	Jahre / km
Ökologie	Materieller Fußabdruck	t Material / Fahrzeug
Ökologie	Kreislaufmaterialverbrauchsquote	%
Ökologie	Anteil kritischer Materialien	% kritische Rohstoffe am Gesamtinput
Ökologie	Eingang zirkulärer Produkte	% Sekundärmaterial am Input
Ökologie	Ausgang zirkulärer Produkte	% recyclingfähiger Output
Ökologie	Materialverbrauch	t / Jahr
Ökologie	Beitrag Recyclingmaterial zur Rohstoffnachfrage	%
Ökologie	Rohstoffverbrauch / Zeiteinheit	t / Monat
Ökologie	Durchschnittliche Feinstaubbelastung der Fahrzeuge	mg PM _{2.5} /km
Ökologie	Wassernutzungseffizienz	m ³ /Fahrzeug oder €/m ³
Ökonomie	Nachhaltigkeitsberichtsquote	ja/nein + Umfang
Ökonomie	F&E-Ausgaben / Umsatz	% vom Umsatz
Ökonomie	F&E-Personal	VZÄ / Anteil an Gesamtbelegschaft
Ökonomie	Patentanmeldungen	Anzahl / Jahr

Ergänzend wurden vier Experteninterviews mit Vertretern der Zulieferindustrie (Tier 1 und 2) durchgeführt. Diese bestätigten die Relevanz zentraler Indikatoren wie Rezyklatanteile, CO₂-Emissionen und Ressourceneffizienz, verdeutlichten jedoch erhebliche Praxishürden: mangelnde Dateninfrastruktur (insbesondere durch Nutzung von Excel als Quasi-Datenbank), Konflikte zwischen Transparenzanforderungen und dem Schutz von Betriebsgeheimnissen, kartellrechtliche Bedenken bei der Datenweitergabe entlang der Lieferkette sowie fehlende einheitliche Berechnungsstandards, die eine branchenweite Vergleichbarkeit erschweren.

Integration von Nachhaltigkeits- und Zirkularitätsindikatoren in der Geschäftsprozessmodellierung

Aufbauend auf den gewonnenen Erkenntnissen wurde Tool konzipiert, als Demonstrator entwickelt sowie getestet, welcher Nachhaltigkeits- und Zirkularitätsindikatoren in die Geschäftsprozessmodellierung integriert. Die systematische Verankerung von ökologischen Zielen in betriebliche Abläufe lässt sich effektiv durch Green Business Process Management (GBPM) realisieren, welches bewährte GPM-Ansätze um Umweltaspekte erweitert (Couckuyt und van Looy 2019). Die Notwendigkeit, ökologische Parameter gleichberechtigt neben finanziellen und operativen Leistungsindikatoren zu steuern, ist heute ein fester Bestandteil progressiver Management-Methodiken (Adams und Frost 2008). Hierbei wurden insbesondere die R-Strategien Reduce, Reuse und Recycle hervorgehoben. Das Ziel bestand darin, ein Softwareartefakt zu schaffen, das Bewertung und Optimierung von Prozessen anhand von Nachhaltigkeits- und Zirkularitätsindikatoren ermöglicht. Das zweite Teilziel war es, eine Lösung vollständig basierend auf Open Source Lösungen zu entwickeln.

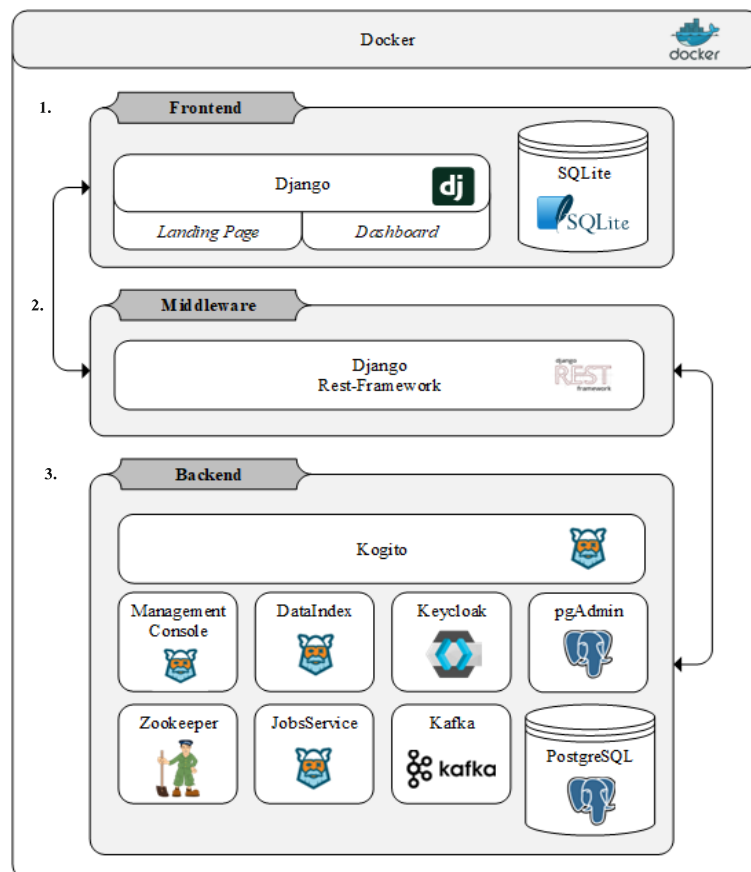


Abbildung 33: Praxisnahe Systemlandschaft (Rau et al. 2025)

Das Ergebnis stellt eine dockerisierte Drei-Schichten-Architektur kombiniert ein Django-Frontend mit einer Kogito-Engine dar. Die Architektur erlaubt eine flexible Erweiterung um weitere Kennzahlen und die Implementierung differenzierter R-Strategien aus Frameworks wie dem R9 von (Kirchherr et al. 2017). Zwar erfordert die technische Einbindung in die Kogito Engine derzeit noch manuelle Anpassungen bei Tasks und Events, doch ließe sich dies künftig durch native Green-BPM-Unterstützung oder semantische Erweiterungen lösen. Eine Weiterentwicklung sollte zudem einen R-Strategie-spezifischen Indikatoren-Katalog sowie eine Erweiterung zum ganzheitlichen Nachhaltigkeits-Dashboard (Triple-Bottom-Line) forcieren.

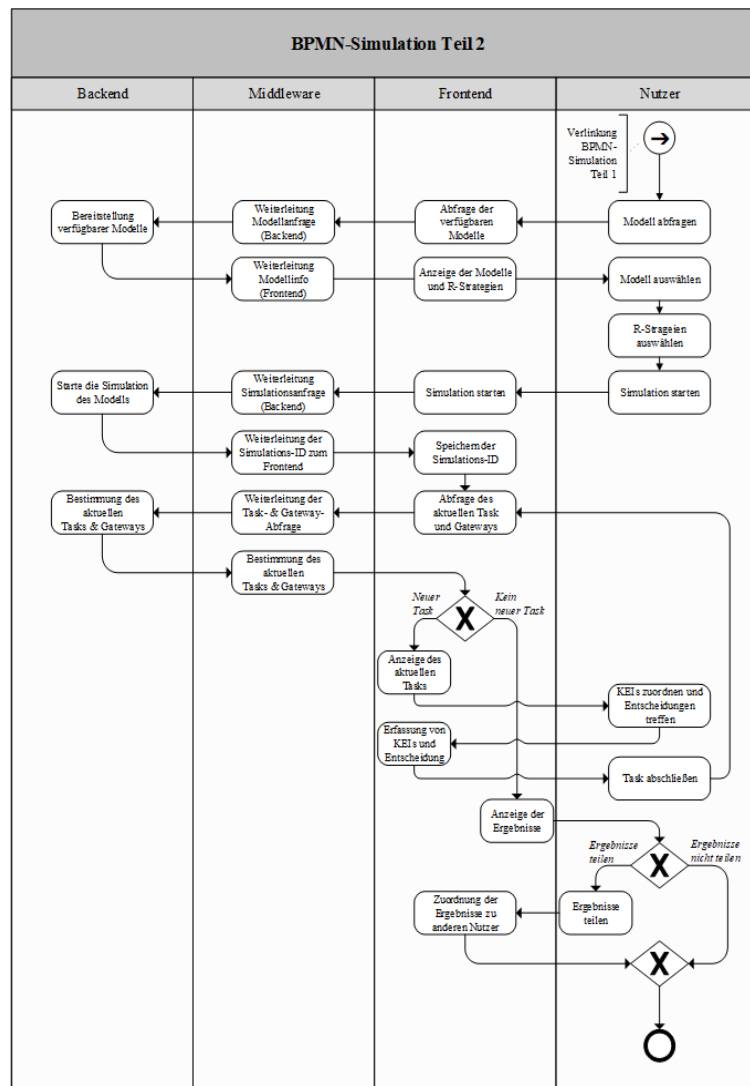


Abbildung 34: Weiterführung des Prozessmodells (Rau et al. 2025)

Dieses Ergebnis wurde zunächst intern getestet und den Projektpartnern vorgestellt. Im Anschluss wurde ein Beitrag geschrieben, welcher im Rahmen des Workshops „Digital Innovations in the Circular Economy: Shaping a Circular Future“ auf der Tagung Wirtschaftsinformatik 2025 und der Demonstrator vorgestellt. Der Beitrag kann dauerhaft auf folgender Seite abgerufen werden: [Link](#)

Durch die Kopplung von BPMN-Simulationen mit spezifischen Kennzahlen wurde aufgezeigt, wie ökologische Auswirkungen auf Prozessebene transparent steuerbar werden. Dies liefert Betrieben eine verlässliche Basis für nachhaltige Modifikationen.

5 Cyber-physische Labore

Im Zeitalter der Digitalisierung und der vierten industriellen Revolution spielen cyber-physische Systeme (CPS) und Labore (CPL) eine entscheidende Rolle bei der Transformation hin zu nachhaltigen CE (Napoleone et al. 2020). Diese Systeme verknüpfen physische Prozesse mit digitalen Steuerungen und ermöglichen dadurch eine präzisere, effizientere und ressourcenschonendere Produktion. Durch den Einsatz von CPS können Rohstoffe und Energie besser genutzt, Abfälle reduziert und die Lebensdauer von Produkten verlängert werden (Meesublak und Klinsukont 2020). Eine zentrale Zielsetzung im Projekt DIONA war die Schaffung und pilotmäßige Implementierung von CPL, um die Herausforderungen und Potenziale der automobilen CE zugänglich zu machen. Die gewonnenen Erkenntnisse dienen zur Optimierung, Skalierung und Evaluation der entwickelten Lösungen aus den Verbundprojekten der Mobilkreis-Förderrichtlinie und bilden somit die Grundlage für eine breite industrielle Anwendung.

Das AP 4 (AP4) des DIONA-Projekts verfolgte das Ziel, die Konzeption und Entwicklung CPL zu realisieren. Dabei sollten sowohl technische Aspekte als auch menschliche Faktoren berücksichtigt werden. Zur Umsetzung wurden im Rahmen von AP 4.1 zunächst verschiedene Konzepte bestehender CPL diskutiert sowie die wissenschaftlichen Grundlagen CPS und insbesondere der sogenannten Cyber-Physical Human Systems (CPHS) erarbeitet. Auf dieser Basis wurden zwei Komponenten eines CPHS umgesetzt: ein Teiletisch mit der Explosionsdarstellung einer Wasserstoffzelle sowie eine damit verbundene Produktionssimulation, um Aspekte einer CE-Produktion zu verdeutlichen. Darüber hinaus wurden in AP 4.2 experimentierfähige Testumgebungen sowohl für die Anwendungsbeschreibung als auch für die Anwendungsvalidierung realisiert. Hierzu wurden die Hardware- und Softwareumgebungen entsprechend vorbereitet und implementiert. Um das Labor für den Live-Betrieb vorzubereiten, wurde eine interne Pilotierung des CPL durchgeführt. Nach deren erfolgreichem Abschluss konnte das CPL im Rahmen von AP 4.3 in mehreren Workshops an den beiden Projektstandorten Dortmund und Chemnitz mit den Verbundpartnern sowie externen Teilnehmenden umfassend erprobt werden. Hierzu sind begleitende Beobachtungen und Evaluationen durchgeführt worden, welche in den stetigen Verbesserungsprozess der Labore flossen.

Die nachfolgenden Kapitel beschreiben die theoretischen Grundlagen (Kapitel 5.1), die Konzeption und den Aufbau eines CPL (Kapitel 5.2) und den Betrieb des CPL (Kapitel 5.3). Abschließend werden die Ergebnisse diskutiert (Kapitel 5.4) und ein Ausblick auf anschlussfähige Projekte gegeben.

5.1 Theoretische Grundlagen

Um ein das AP übergreifendes Verständnis von CPS zu schaffen, wurde zunächst eine Literaturanalyse zum Konzept der CPS sowie deren Weiterentwicklung zu CPHS: CPS verbinden physische und digitale Komponenten in einem gemeinsamen Wirkungszusammenhang. Obwohl der Begriff CPS selten Teil der Alltagssprache ist (ganz im Gegensatz zu bspw. Nachhaltigkeit und CE), gewinnen diese Systeme zunehmend an Bedeutung im täglichen Leben. Beispiele dafür sind Smartwatches, die Vitaldaten erfassen und analysieren, oder digital abgebildete Lagerbestände und Produktionsprozesse in der Industrie. Die Verbreitung solcher Systeme wird durch die Verfügbarkeit leistungsfähiger und kostengünstiger Technologien wie Smartphones sowie den Ausbau von Mobilfunknetzen, etwa 5G, ermöglicht.

Während CPS häufig rein technisch betrachtet werden, wird in der Wissenschaft die Notwendigkeit einer ganzheitlichen Betrachtung von Mensch und Technik diskutiert. Dies hat zur Entwicklung des Konzepts CPHS geführt, das den Menschen stärker in den Fokus rückt. Ziel von CPHS ist es, durch eine kooperative Interaktion zwischen Mensch und Maschine einen größeren Mehrwert zu schaffen als beide allein erreichen könnten. Dabei zeigt sich ein Wandel von einfachen Interaktionen hin zu einer echten Zusammenarbeit zwischen Mensch und Maschine. Diese Kooperation soll insbesondere die Kreativität und Flexibilität des Menschen fördern und gleichzeitig soziale sowie ökonomische Verbesserungen ermöglichen.

Die Einführung von CPHS bringt jedoch sowohl technische als auch menschliche Herausforderungen mit sich. Auf technischer Ebene gibt es Probleme wie fehlende Standardisierung aufgrund der Heterogenität CPS, ineffizienten Energieverbrauch bei Sensoren oder Sicherheitsrisiken durch

mögliche Cyberangriffe auf digitale Schnittstellen. Zudem sind gängige Programmiersprachen oft nicht in der Lage, komplexe semantische Prozesse adäquat abzubilden. Auf menschlicher Ebene ergeben sich Herausforderungen wie die Akzeptanz neuer Technologien am Arbeitsplatz oder Fragen der Mitbestimmung bei deren Einführung – insbesondere vor dem Hintergrund rechtlicher Regelungen wie dem Betriebsverfassungsgesetz in Deutschland. Weitere soziale Aspekte betreffen Arbeitssicherheit sowie mögliche Überforderungen durch neue digitale Arbeitsprozesse.

Darüber hinaus werfen global vernetzte CPHS regulatorische Fragen auf: Sie überschreiten nationale Grenzen und stellen herkömmliche staatliche Kontrollmechanismen infrage. Auch gesellschaftlich aggregierte Auswirkungen wie soziale Ungleichheiten oder Einflüsse auf die Klimakrise sind wissenschaftlich diskutierte Themenfelder im Zusammenhang mit CPHS.

Im Bereich technologischer Entwicklungen spielen disruptive Innovationen eine zentrale Rolle für CPHS. Dazu gehören das Metaverse – virtuelle Räume aus physischer und digitaler Realität –, Big Data Analysis zur Verarbeitung großer Datenmengen sowie das Internet der Dinge (IoT), das physische Objekte über Sensoren miteinander vernetzt. Künstliche Intelligenz (KI) ist ebenfalls ein wichtiger Bestandteil aktueller Forschung im Feld CPHS. Besonders hervorzuheben ist zudem das Konzept des Digitalen Zwillings: Dabei handelt es sich um eine digitale Repräsentation eines physischen Produkts oder Prozesses, die Simulationen ermöglicht, ohne reale Abläufe zu unterbrechen.

CPL haben sich im letzten Jahrzehnt zu zentralen Erprobungsräumen für CPS entwickelt, insbesondere in den Bereichen Ausbildung, Forschung und Entwicklung. Sie kombinieren physische und virtuelle Elemente, um Prozesse, Strategien oder Abläufe ohne direkte Konsequenzen zu testen und zu optimieren. Dabei bieten sie eine kostengünstige Möglichkeit für unterschiedliche Akteur:innen, Transformationsszenarien praktisch zu erproben. Diese Labore knüpfen an das klassische Bildungslabor an, das seit dem 19. Jahrhundert Lernen durch praktische Erfahrungen fördert und komplexe Konzepte sowie wissenschaftliche Problemlösungen greifbar macht. CPL machen solche Experimente auch Organisationen zugänglich, die sich die hohen Kosten traditioneller technischer Labore nicht leisten können oder wollen.

Die Einsatzmöglichkeiten dieser Labore sind vielfältig und erstrecken sich auf Ingenieurwesen, Technologie und Physik. Insbesondere werden sie in Bildungskontexten genutzt, etwa für ingenieurtechnisches Training oder zur Vermittlung komplexer Sachverhalte an Universitäten. In der Forschung finden Anwendungen wie Life-Science-Experimente (Biologie und Chemie), Automationstechnologien, Hardware-in-the-Loop-Systeme, Augmented Reality, Haptik, Energietransfer oder additive Fertigung (z. B. 3D-Druck) breite Verwendung. Ein häufig genutztes Werkzeug in CPL ist der Digitale Zwilling – eine virtuelle Repräsentation eines physischen Objekts –, der dynamische Interaktionen zwischen realer Welt und virtuellen Modellen ermöglicht. Digitale Zwillinge sowie Simulationen sind zentrale Bestandteile dieser Labore. Für effektives Lernen CPL sind unterstützende Materialien essenziell. Dazu gehören Lernunterlagen, die den pädagogischen Rahmen berücksichtigen sowie Orientierungshilfen wie digitale Lerngerüste, Anleitungen und Heuristiken. Diese helfen dabei, abstrakte Konzepte verständlich zu machen und den Lerneffekt zu maximieren.

5.2 Konzeption und Aufbau eines cyberphysischen Labors

Hauptziel des AP4 ist die Entwicklung und der Betrieb eines CPL. Das CPL dient dabei als Anlaufstelle insbesondere für KMU um Wissen im Bereich der CE aufzubauen und erste Schritte in der Transformation hin zu dieser anzustoßen. Aus diesem Grund war zunächst eine sorgfältige Konzeption des CPL und Anforderungserfassung notwendig, um diese Bedarfe auch bedienen zu können. Der eigentliche Aufbau des CPL gliedert sich anschließend in die physische und digitale Repräsentation, die allerdings starke Verknüpfungen aufweisen. Das so entwickelte und aufgebaute CPL unterliegt stetigen Anpassungen und Erweiterungen, um es sukzessive zu verbessern und noch besser auf die Wünsche der Nutzer anzupassen. Dieser beschriebene Prozess wird im Folgenden genauer erläutert, beginnend mit der Ableitung von Anforderungen.

Anforderungen

Um Feedback zur Konzeption des CPL zu sammeln, wurden vier standardisierte Feedbackrunden mit den Verbundpartnern durchgeführt. Hierfür wurde jeweils der aktuelle Stand der Konzeption in einer PowerPoint-Präsentation zusammengefasst, präsentiert und das entsprechende Feedback und

Diskussionspunkte gesammelt sowie in der weiteren Konzeption berücksichtigt. Die Interviews liefern wertvolle Erkenntnisse zu den Anforderungen und Potenzialen eines CPL, insbesondere im Kontext der CE und seiner Relevanz für KMUs:

Ein zentraler Punkt ist die klare Kommunikation der Funktion des CPL und der Art des CPLs, da das Konzept noch nicht so bekannt ist und unter dem Begriff „Labor“ häufig eine große Testing-Facility verstanden wird. Es sollte eindeutig sein, ob es sich um einen Demonstrator oder ein aktives System handelt, um Missverständnisse zu vermeiden. Diese Diskussionen ergaben, dass für KMUs ein cyberphysischer Demonstrator besondere Vorteile bieten kann, da diese selten kompletten Systeme betrachten können. Die Möglichkeit einer differenzierten Analyse verschiedener Ebenen wie Capex (Investitionskosten) oder Opex (Betriebskosten) sowie Systemgrenzen einzelner Bauteile oder Produktionsprozesse simulativ oder computergestützt zu ergründen – beispielsweise bei Brennstoffzellen wurde als Chance insbesondere für KMUs wahrgenommen, da diese selten ganzheitliches Systemwissen besitzen. Hierdurch könnten Synergien oder Optimierungspotenziale identifiziert werden. Eine Gegenüberstellung alternativer Produktdesigns und Produktionsprozesse, etwa modularer versus verklebter Brennstoffzellen, könnte den Mehrwert solcher Simulationen verdeutlichen.

Ein zentrales Anliegen der Befragten ist die Berücksichtigung wirtschaftlicher Aspekte wie Zeit-, Kosten- und Risikofaktoren in den Simulationen. Für KMUs sind wirtschaftliche Kriterien essenziell: Das CPL sollte zeigen, ob Investitionen innerhalb kurzer Zeiträume amortisiert werden können. Gleichzeitig sollten soziale und ökologische Faktoren stärker berücksichtigt werden. Neben ökologischen Zielen wie Energieeffizienz rückt zunehmend auch der soziale Impact in den Fokus – etwa menschenwürdige Arbeitsbedingungen oder Inklusion am Arbeitsplatz. Besonders jüngere Kundengruppen legen Wert auf nachhaltige Produkte, was das CPL nutzen könnte, um Unternehmen bei der Anpassung ihrer Geschäftsmodelle zu unterstützen. Die Integration von hierfür relevanten Kennzahlen, wie CO₂-Einsparungen, Durchlaufzeiten oder Kosten ist entscheidend für die Nachvollziehbarkeit konkreter Verbesserungen durch CE-Anpassungen. Um diese spielerisch erlebbar zu machen, wurde vorgeschlagen, interaktive Elemente wie quizartige Präsentationen und Gamefication-Elemente in das CPS einzubinden: Beispielsweise könnten Nutzern Fragen beantworten wie „Was ist nachhaltiger?“ oder „Was ist finanziell sinnvoller?“. Diese Ansätze fördern Aha-Effekte und helfen dabei, die Anwendungsmöglichkeiten Digitaler Zwillinge greifbarer zu machen.

Neben technischen Fragestellungen wurde auch betont, dass neue Geschäftsmodelle berücksichtigt werden sollten: Beispielsweise könnten langlebige Produkte gesellschaftlich wünschenswert sein, bringen jedoch weniger Profit aufgrund ihrer längeren Lebensdauer. Hier wäre es interessant abzuwägen, unter welchen Voraussetzungen solche Produkte dennoch attraktiv gestaltet werden können – sowohl für Unternehmen als auch für Konsument:innen.

Um das CPL erfolgreich zu etablieren und langfristig relevant zu machen, sollte besonderes Augenmerk auf seine Dissemination gelegt werden. Präsentationen bei Wirtschaftsverbänden und Kongressen bieten eine gute Möglichkeit zur Verbreitung des Demonstrators und zur Einladung von Unternehmen zur Partizipation. Oft liegt das Problem nicht in der Erstellung eines solchen Systems, sondern darin, dass es anschließend nicht ausreichend genutzt wird – diesem Risiko kann durch gezielte Maßnahmen entgegengewirkt werden. Ein weiterer wichtiger Aspekt für die Durchführung von CPS ist die Einbindung eines möglichst heterogenen Publikums in Vorführungen des CPLs sowie anschließende Diskussionen über gesellschaftliche Relevanz und mögliche Weiterentwicklungen des Labors. Dies würde sicherstellen, dass unterschiedlichste Perspektiven berücksichtigt werden können.

Zusammenfassend zeigt sich ein breites Spektrum an Anforderungen an das CPL: Von klarer Kommunikation seiner Funktionen über wirtschaftliche Simulationsziele bis hin zur Integration sozialer und ökologischer Aspekte bietet das Feedback zahlreiche Impulse für die weitere Entwicklung des CPLs als praxisnahes Werkzeug für Forschung, Ausbildung sowie industrielle Anwendungen im Kontext der CE.

Konzept und Umsetzung des cyberphysischen Labors

Basierend auf den abgeleiteten Anforderungen konnten die physischen und digitalen Repräsentationen konzeptioniert und umgesetzt werden. Die so entstandenen Artefakte werden im Folgenden knapp vorgestellt.

5.2.1 Physische Repräsentation

Im Rahmen des Projekts wurde ein didaktisches Gesamtkonzept zur anschaulichen Vermittlung von CE-Aspekten entwickelt und umgesetzt. Dieses besteht aus einem modularen Teiletisch-System sowie einem Messekoffer zur Anwendung außer Haus.

Der Teiletisch setzt sich aus drei einzelnen Tischelementen zusammen, die gemeinsam einen Workshop zur CE ermöglichen. Die Zielgruppe sind insbesondere KMU der Automobilindustrie.

- **Tisch 1: Explosionsmodell**

Hier wird ein PEM-Brennstoffzellenstack vom Typ OSS50 als beleuchtetes Explosionsmodell (siehe Abbildung 35) präsentiert. Er dient als gemeinsamer Use-Case und Einstieg in die Thematik. Gut zu erkennen sind die vielfältigen Werkstoffe und Fertigungsverfahren.

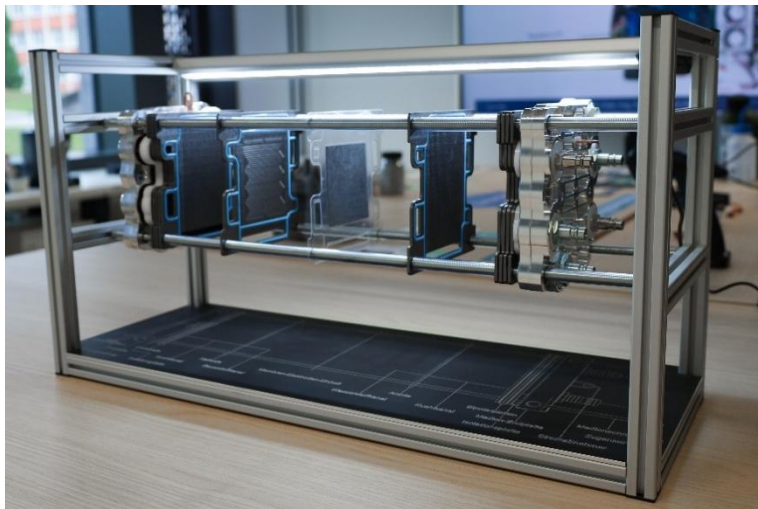


Abbildung 35: Explosionsmodell eines PEM-Brennstoffzellenstack vom Typ OSS50

- **Tisch 2: Kreislaufmap**

Dieser Tisch enthält eine folierte (Land-)Karte mit Informationskarten zu den *R-Strategien* (z. B. Refuse, Reuse, Recycle) sowie exemplarische Brennstoffzellenkomponenten (siehe Abbildung 36). Die Teilnehmenden erhalten dadurch konkrete Einblicke in Umsetzungsoptionen innerhalb des Produktlebenszyklus, angefangen von der Entwicklung bis hin zur Aussonderung und Entsorgung aufgrund Obsoleszenz.



Abbildung 36: Kreislauf-Map mit Exponaten aus dem Bereich der Brennstoffzellen

- **Tisch 3: Demonstrator**

Ein RC-Fahrzeug mit Brennstoffzellenantrieb auf einem Allrad-Rollenprüfstand (siehe Abbildung 37) wird mit einem Simulations-Dashboard gekoppelt, das auf einem Smartboard dargestellt wird.

Anhand veränderbarer Randbedingungen wie Fahrweise, Karosserieform oder Zuladung können unterschiedliche Nutzungsszenarien nachvollzogen und deren Auswirkungen interaktiv erfahren werden.

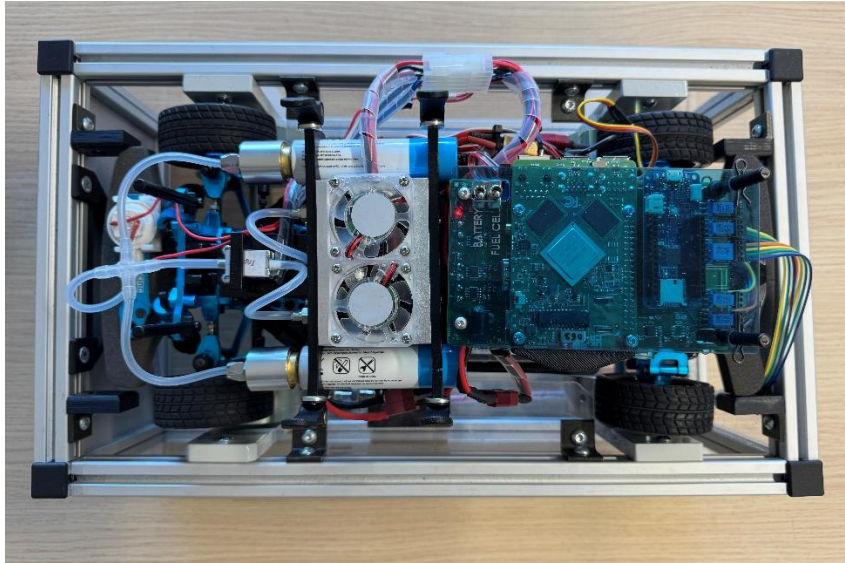


Abbildung 37: Brennstoffzellen-Fahrzeug auf Allrad-Rollenprüfstand

Ergänzend wurde ein Messekoffer konzipiert und aufgebaut (siehe Abbildung 38), der einerseits die sichere Verpackung und den flexiblen Transport aller Einzelteile ermöglicht und andererseits zugleich den Messestand selbst darstellt. Damit ist das Workshop-Format nicht an einen festen Ort gebunden und kann auf externen Veranstaltungen eingesetzt werden. Die Art und Weise der Beschaffenheit des Messekoffers ermöglicht den quasi autarken Einsatz auf Messen und anderen externen Veranstaltungen. Lediglich ein 230V-Stromanschluss wird benötigt.



Abbildung 38: Messekoffer zum mobilen Aufbau des CPL

Durch die so entstandene physische Repräsentation sowohl im stationären als auch mobilen Aufbau (siehe Abbildung 39) wird CE praxisnah erfahrbar gemacht und die Brücke zwischen theoretischen Konzepten und industrieller Anwendung geschlagen.

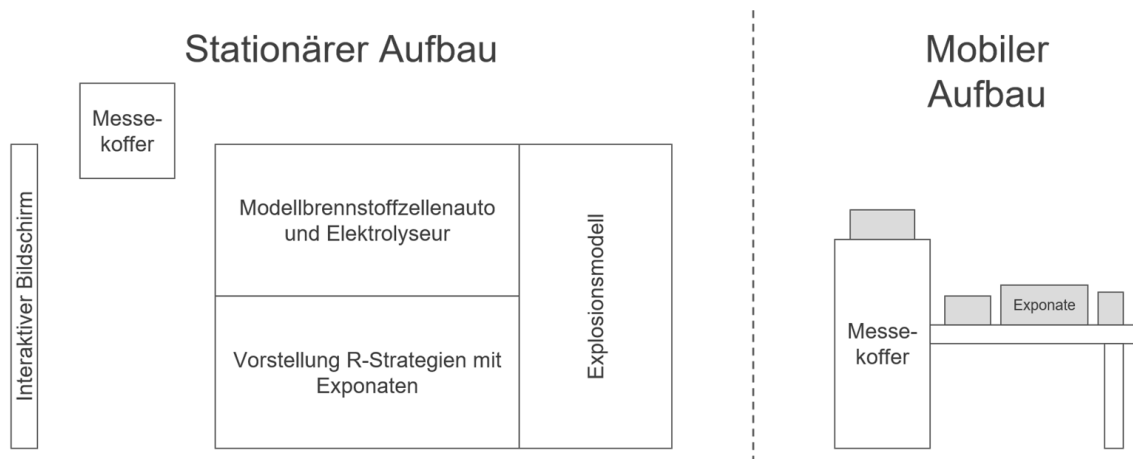


Abbildung 39: Grundsätzlicher stationärer und mobiler Aufbau des CPL

5.2.2 Digitale Repräsentation

Zur Verwaltung der verschiedenen Funktionalitäten des Labors wurde ein Django-Webserver eingerichtet. Dieser dient als zentrale Plattform, auf der das DIONA-Projekt vorgestellt, die PEM-BZ-Wasserstoffbrennstoffzelle visualisiert und die Simulation eingebettet wird. Darüber hinaus können über die Weboberfläche der FCAT-Demonstrator gesteuert sowie verschiedene Dashboards zur Auswertung der FCAT- und Simulationsdaten angezeigt werden. Zusätzlich sind interaktive Workshopinhalte integriert, beispielsweise das R-Strategien-Spiel oder ein Prozessmodellierungstool, die zur Vermittlung der Prinzipien der CE beitragen. Die Webseite bildet somit die Schnittstelle zwischen Demonstration, Forschung und Schulung und ermöglicht es, komplexe Zusammenhänge anschaulich darzustellen.

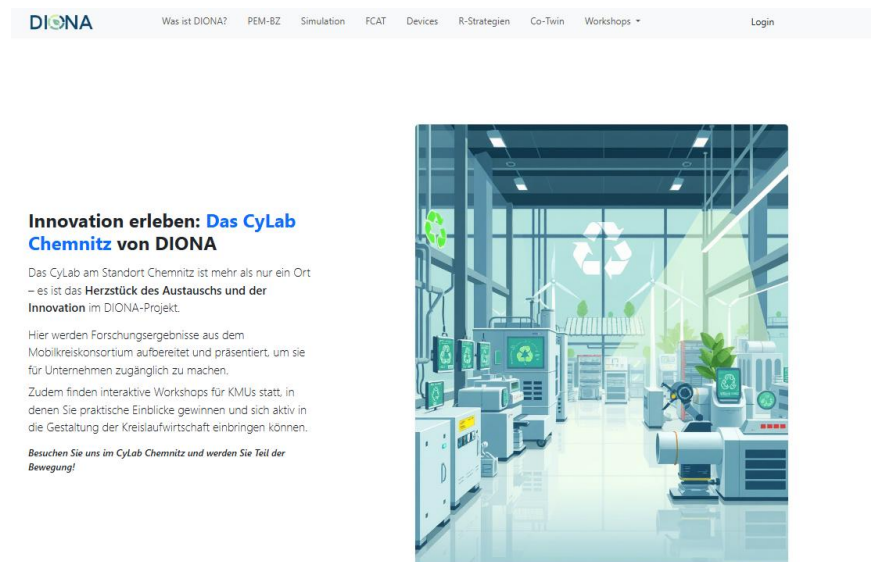


Abbildung 40: CyLab Manager

Das technische Back-End basiert auf einem Container-Virtualisierungskonzept, das eine modulare und wartungsfreundliche Systemarchitektur sicherstellt. Auf einem Ubuntu-Server läuft die Virtualisierungsumgebung Docker, über die alle Softwarekomponenten als isolierte Container betrieben werden. Dadurch kann das System flexibel skaliert und bei Bedarf schnell angepasst oder erweitert werden. Sollte eine Komponente ausfallen, kann sie gezielt neu gestartet oder aktualisiert werden, ohne den Betrieb des Gesamtsystems zu beeinträchtigen. Zudem ermöglicht das Konzept die einfache Integration weiterer Anwendungen aus dem Mobilkreiskonsortium, was die Wiederverwendbarkeit und Erweiterbarkeit der Infrastruktur erhöht.

Die Systemarchitektur ist so ausgelegt, dass ein bidirektionaler Datenaustausch zwischen physischen Komponenten und ihren digitalen Repräsentationen erfolgt. Über eine IoT-Schnittstelle werden Sensordaten mithilfe von Eclipse Mosquitto erfasst und an die InfluxDB-Zeitreihendatenbank weitergeleitet. Anschließend können die Daten über Grafana visualisiert und analysiert werden. Parallel dazu stellt das System ein REST-API Steuerungs- und Monitoringfunktionen bereit, die über die Geräte wie der FCAT-Demonstrator oder externe Sensoren direkt über die Weboberfläche angesprochen werden. Dadurch entsteht eine durchgängige Verbindung zwischen realen und virtuellen Elementen, die eine Echtzeitüberwachung und -steuerung ermöglicht.

Das technische Back-End basiert auf einem Container-Virtualisierungskonzept, das eine modulare und wartungsfreundliche Systemarchitektur sicherstellt. Auf einem Ubuntu-Server läuft die Virtualisierungsumgebung Docker, über die alle Softwarekomponenten als isolierte Container betrieben werden. Dadurch kann das System flexibel skaliert und bei Bedarf schnell angepasst oder erweitert werden. Sollte eine Komponente ausfallen, kann sie gezielt neu gestartet oder aktualisiert werden, ohne den Betrieb des Gesamtsystems zu beeinträchtigen. Zudem ermöglicht das Konzept die einfache Integration weiterer Anwendungen aus dem Mobilkreiskonsortium, was die Wiederverwendbarkeit und Erweiterbarkeit der Infrastruktur erhöht.

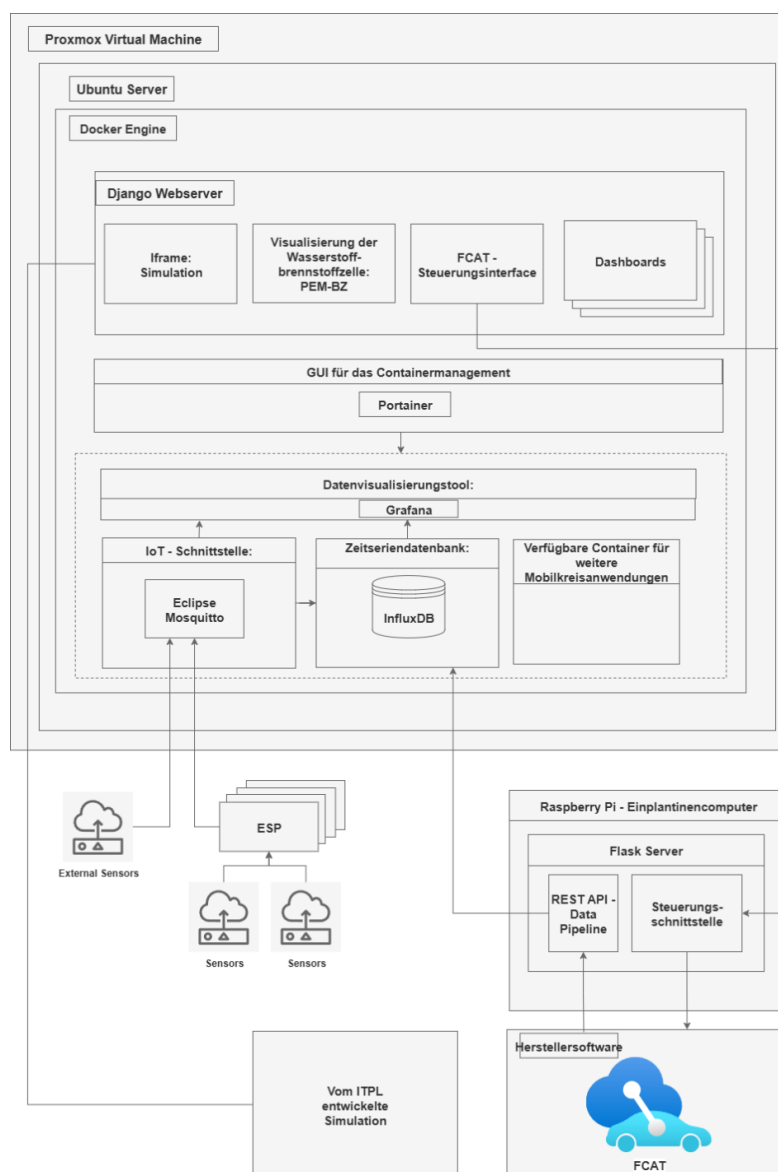


Abbildung 41: Aufbau des CPL

Durch diese Kopplung physischer und digitaler Systeme wird es möglich, Veränderungen entlang des gesamten Produktlebenszyklus anschaulich darzustellen. Das Labor dient somit als praxisorientierte Demonstrations- und Lernumgebung, in der technologische Innovationen erlebbar gemacht und die

Potenziale digital unterstützter Prozesse in der CE vermittelt werden. Insbesondere wurde dazu ein Simulationsmodell entwickelt.

Im Zuge der Entwicklung des CPL wurden spezifische Anforderungen an das übergeordnete Simulationsmodell erarbeitet. Diese Anforderungen, die exemplarisch in Tabelle 22 aufgeführt sind, wurden innerhalb des Projektteams diskutiert und durch eine Literaturrecherche systematisch verifiziert. Sie bilden die methodische und technische Grundlage für die Entwicklung des digitalen Teils des CPL.

Tabelle 22: Exemplarischer Auszug aus dem Anforderungskatalog

ID	Anforderung	Beschreibung	Beziehung
...	...	...	...
16	Stakeholder	Das Simulationssystem soll fähig sein, Stakeholder unter Nutzung von dyn. Parameter zu integrieren.	-
17	Anwender	Das Simulationsmodell muss den Anwender darstellen.	18
18	Anwender-verhalten	Das Simulationsmodell soll fähig sein, das dynamische Anwenderverhalten berücksichtigen.	24
19	Dashboard	Das Simulationsmodell soll ein Dashboard haben.	16, 20, 21, 30, 32
...	...	...	...

Die in Tabelle 22 dargestellten Anforderungen verdeutlichen die zentrale Rolle der Modellierung von Akteuren und deren Interaktionen innerhalb des Simulationssystems. So adressieren die Anforderungen 16 bis 18 insbesondere die Abbildung von Stakeholdern und Anwendern sowie deren dynamischem Verhalten, wodurch die Grundlage für eine realitätsnahe Modellierung von Entscheidungsprozessen geschaffen wird. Darüber hinaus verdeutlicht die Anforderung 19 die Notwendigkeit einer nutzerorientierten Aufbereitung der Simulationsergebnisse durch ein Dashboard, das sowohl Transparenz als auch Interaktivität sicherstellt. In ihrer Gesamtheit zeigen die Anforderungen den Anspruch, das Simulationsmodell nicht lediglich als technische Rechenumgebung, sondern als integratives Werkzeug für Analyse, Kommunikation und Entscheidungsunterstützung im Kontext des CPL zu gestalten.

Die Rahmenbedingungen des CPL ergeben sich aus der Kombination physischer und digitaler Komponenten sowie aus den Eigenschaften des vorhandenen Workshopraums. Hierbei kommt der Entwicklung geeigneter Darstellungsformen eine zentrale Bedeutung zu. Zum einen ist eine Präsentationsfläche bereitzustellen, die die Anwendungsperspektive adressiert und ausreichend Platz für die Interaktion durch die Nutzenden bietet. Zum anderen ist die Visualisierung und Interaktion innerhalb der Validierungsperspektive zu ermöglichen.

Ein zentrales Element zur Umsetzung des CPS-Konzepts besteht im bidirektionalen Datenaustausch zwischen physischen und digitalen Laborkomponenten. Inhaltlich liegt der Schwerpunkt auf der Möglichkeit, verschiedene Szenarien der CE anhand eines konkreten Produktlebenszyklus zu modellieren und zu analysieren. Als Referenzprodukt dient hierbei eine Wasserstoff-Brennstoffzelle in Form einer Polyelektrolytmembran-Brennstoffzelle (PEMFC), die sich auch in physischer Form im Labor befindet. Die Auswahl dieser Technologie begründet sich in der ausgewiesenen Expertise des Lehrstuhls für alternative Fahrzeugantriebe im Bereich der Herstellung und Nutzung von PEMFC-Systemen.

Entlang des Lebenszyklus der PEMFC werden die Potenziale zur Integration von Prinzipien der CE systematisch untersucht. Dabei fließen nicht nur die Ergebnisse des DIONA-Projekts ein, sondern ebenso die Resultate der Verbundpartner im Rahmen des MobilKreis-Konsortiums. Das CPL fungiert somit als Plattform, welche die konsolidierten Ergebnisse des MobilKreis-Konsortiums in strukturierter Form einer breiten Öffentlichkeit zugänglich macht. Dabei steht die Verbindung zwischen physischer und digitaler Welt im Vordergrund. Dafür wird insbesondere die Methode der Simulation genutzt.

Im übergeordneten Simulationsmodell werden Fahrverhalten und Abnutzung systematisch untersucht, um deren Auswirkungen auf die Supply Chain einer Wasserstoff-Brennstoffzelle abzubilden. Exemplarisch wird hierbei die Fertigung von Aluminium-Endplatten für PEMFC detaillierter simuliert. Die Zusammenhänge der dafür eingesetzten Modellierungsansätze sind in Abbildung 42 dargestellt.

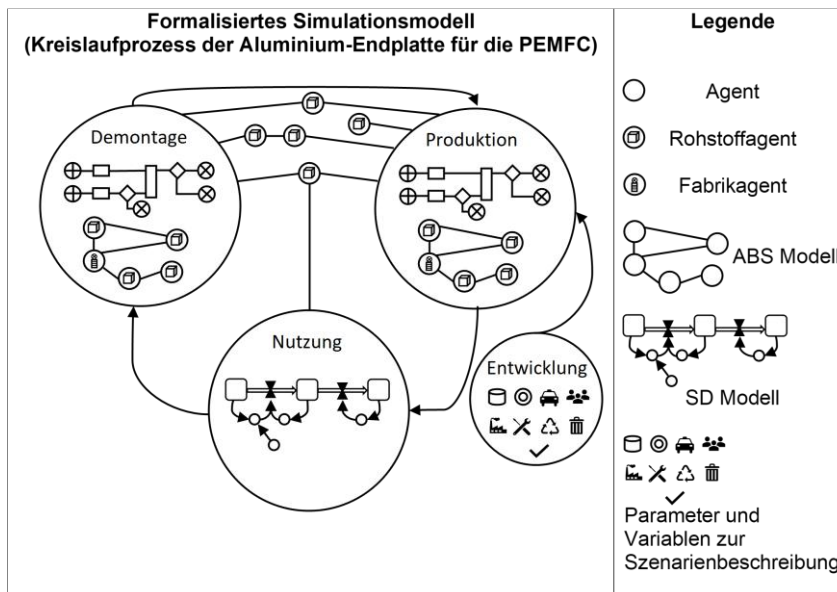


Abbildung 42: Makroebene des hybriden Simulationsmodells

Ein wesentlicher Vorteil des gewählten Ansatzes liegt in der Nutzung eines hybriden, hierarchisch aufgebauten Simulationsmodells (siehe Abbildung 42). Diese Struktur erlaubt die Kombination unterschiedlicher Modellierungsparadigmen – wie beispielsweise agentenbasierter Modelle zur Abbildung individueller Akteure und System-Dynamics-Modelle zur Darstellung übergeordneter Prozesse – innerhalb einer integrierten Architektur. Dadurch können sowohl detaillierte Analysen auf Mikroebene als auch strategische Bewertungen auf Makroebene durchgeführt werden. Die hierarchische Organisation fördert zudem die Modularität und Erweiterbarkeit des Systems, sodass einzelne Ebenen unabhängig weiterentwickelt werden können, ohne die Gesamtintegrität des Modells zu beeinträchtigen. Insgesamt trägt dieser Ansatz dazu bei, die Komplexität industrieller Wertschöpfungsketten adäquat abzubilden und gleichzeitig praxisnahe Entscheidungshilfen für die Gestaltung zirkulärer Produktlebenszyklen bereitzustellen.

Die entwickelte Simulation orientiert sich an den Phasen eines Produktlebenszyklus und gliedert sich dabei in die Bereiche Entwicklung, Produktion, Nutzung, Demontage sowie Ergebnisdarstellung (siehe Abbildung 43). Diese Struktur ermöglicht eine umfassende Betrachtung des gesamten Lebenszyklus eines Produkts und bietet eine Grundlage für fundierte Analysen und strategische Entscheidungen.

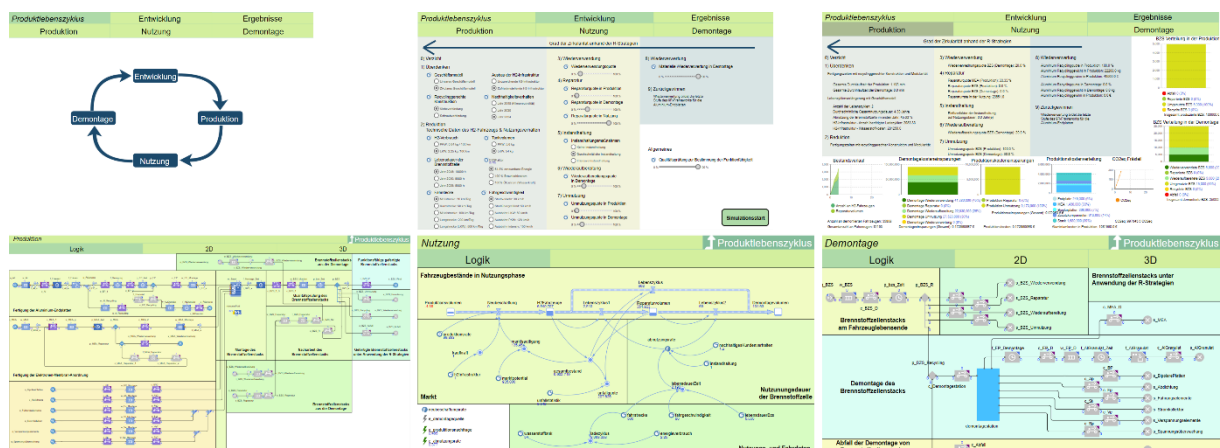


Abbildung 43: Ausschnitt der hybriden Simulation eines Lebenszyklus einer Wasserstoffbrennstoffzelle

In der Entwicklungsphase erlaubt die Simulation eine flexible und individuelle Parametrisierung durch den Nutzer. Um verschiedene Nachhaltigkeitsstrategien (R-Strategien) zu berücksichtigen, wurden spezifische Optionen als Ausgangsbasis implementiert. Die Konfiguration erfolgt dabei besonders benutzerfreundlich über intuitive Elemente wie Toggle-Auswahlen oder Schieberegler, wodurch auch komplexe Anpassungen einfach vorgenommen werden können. Die Produktions- und Demontageprozesse sind durch ereignisdiskrete Simulationen abgebildet, die präzise Abläufe modellieren und analysierbar machen. Zur besseren Verständlichkeit stehen dem Nutzer drei unterschiedliche Ansichten – Logik-, 2D- sowie 3D-Darstellungen – zur Verfügung. Diese Visualisierungsmöglichkeiten erleichtern nicht nur das Verständnis der Prozesse, sondern tragen auch dazu bei, potenzielle Optimierungspotenziale schneller zu erkennen. Als exemplarisches Untersuchungsobjekt wurde eine Aluminium-Endplatte gewählt, da sie typische Produktionsschritte repräsentiert, die sowohl kleinen und mittleren Unternehmen (KMU) als auch größeren Industriebetrieben vertraut sind. Die Nutzungsphase wird durch ein System-Dynamics-Modell abgebildet. Dieses Modell integriert Daten aus Befragungen sowie Literaturquellen, um das Kundenverhalten detailliert zu analysieren – beispielsweise hinsichtlich der Mehrfachnutzung von Produkten. Darüber hinaus berücksichtigt es zentrale Marktmechanismen wie die Marktsättigung, wodurch realistische Szenarien modelliert werden können.

Um eine nahtlose Integration der verschiedenen Simulationsbereiche zu gewährleisten, kommt agentenbasierte Modellierung zum Einsatz. Dabei agieren Rohstoffagenten zwischen den Ebenen der Simulation und werden zum Beispiel von Fabrikagenten innerhalb der Produktions- und Demontageprozesse weiterverarbeitet. Durch diese dynamische Interaktion entsteht ein kohärentes Gesamtmodell des Produktlebenszyklus.

Die Ergebnisse der Simulation werden schließlich in einem übersichtlichen Dashboard visualisiert. Dieses ermöglicht eine schnelle Erfassung der Resultate aus den unterschiedlichen Simulationsbereichen sowie deren Bewertung im Hinblick auf die gewählten Nachhaltigkeitsstrategien. Das Dashboard ist flexibel gestaltet und kann ohne großen Aufwand um zusätzliche Messgrößen erweitert werden, sodass es individuell an neue Anforderungen angepasst werden kann. Die aufbereiteten Ergebnisse bieten zudem eine wertvolle Grundlage für Diskussionen über die ausgewählten R-Strategien und unterstützen aktiv die Entscheidungsfindung bei einer optimierten Strategiewahl.

Die Simulation ermöglicht es, sowohl die Effekte von Änderungen innerhalb der Produktion als auch die Auswirkungen unterschiedlicher Nutzungsweisen über längere Zeiträume hinweg zu analysieren. Auf diese Weise können einzelne Anpassungen in Entwicklung, Fertigung, Demontage oder Nutzung risikolos und explizit untersucht werden. Durch die gezielte Parametrierung des Modells ist es darüber hinaus möglich, eine Rückkopplung mit dem physischen RC-Fahrzeug zu realisieren. Analog zum Konzept des Digitalen Zwillings können reale Messwerte in die Simulation integriert und zur kontinuierlichen Anpassung der Modellparameter genutzt werden. Gleichzeitig lassen sich Ergebnisse der Simulation in den physischen Raum zurückspielen, beispielsweise über ein Dashboard zur Visualisierung relevanter Kennzahlen und Rückmeldedaten.

5.3 Betrieb des cyberphysischen Labors

Das CPL dient insbesondere dem Wissenstransfer zum Thema CE in KMUs. Um dies zu ermöglichen, wurden unterschiedliche Formate wie Workshops entwickelt, die stetig weiterentwickelt wurden. Im Folgenden wird insbesondere auf die Workshopformate eingegangen sowie auf Herausforderungen und die Weiterentwicklung der Formate.

5.3.1 Workshopformate

Die im Rahmen des CPL entwickelten Workshops wurden zunächst in Präsenz insbesondere in Chemnitz und Dortmund angeboten und im weiteren Verlauf um digitale Formate ergänzt. Diese Ausweitung erhöhte nicht nur die Flexibilität der Teilnahme, sondern erweiterte zugleich die Reichweite des Angebots. Der Ablauf folgte einem klar strukturierten Konzept: Vor Beginn erhielten die Teilnehmenden eine Vorbefragung, die sowohl eine Einschätzung der vorhandenen Vorkenntnisse ermöglichte als auch als Grundlage für einen Vorher-Nachher-Vergleich diente. Nach einer themenspezifischen Einführung und einer kurzen Vorstellungsrunde wurden die Workshops mit interaktiven Elementen durchgeführt, um die aktive Einbindung der Teilnehmenden zu fördern. Zum

Abschluss erfolgte eine direkte Feedbackrunde, ergänzt durch eine detaillierte Abschlussbefragung im Nachgang.

Im Rahmen des Projekts DIONA wurden drei themenspezifische Workshopformate konzipiert und im CPL erprobt, die sich an unterschiedlichen Lernzielen und Kompetenzdimensionen orientieren:

1. Kreislaufwirtschaft greifbar gemacht: Der Grundlagen-Workshop

Dieser Workshop richtete sich insbesondere an Teilnehmende ohne oder mit geringen Vorkenntnissen und hat das Ziel, ein grundlegendes Verständnis für die Prinzipien der CE zu vermitteln. Eindrücke des Workshops sind Abbildung 44 und Abbildung 45 zu entnehmen. Der Grundlagenworkshop kombinierte theoretische Inhalte mit praxisnahen Demonstrationen und ist in drei aufeinander aufbauende Teile gegliedert. Zu Beginn erarbeiteten die Teilnehmenden gemeinsam einen konkreten Use-Case, der als roter Faden durch den gesamten Workshop dient. Anhand dieses Beispiels wurden zentrale Prinzipien der CE vorgestellt und erste Potenziale für zirkuläre Strategien identifiziert. Im zweiten Abschnitt stand das 10R-Modell im Fokus, bei dem die zehn Strategien der CE, von Refuse bis Recover, detailliert erläutert werden. Jede Strategie wurde durch anschauliche Beispiele aus der Brennstoffzellentechnologie veranschaulicht, um ihre praktische Anwendung greifbar zu machen. So wurde etwa beim Prinzip Rethink gezeigt, wie innovative Dichtungskonzepte in Brennstoffzellenstacks eine reparatur- und wartungsfreundlichere Gestaltung ermöglichen können. Diese Beispiele verdeutlichen, wie technologische Innovationen dazu beitragen, Materialien effizienter zu nutzen, die Lebensdauer von Produkten zu verlängern und Instandsetzungsprozesse zu vereinfachen. Die Teilnehmenden brachten dabei eigene Ideen ein und entwickelten erste Ansätze für die Umsetzung zirkulärer Strategien in ihren eigenen Produkten oder Dienstleistungen. Im dritten Abschnitt widmete sich der Workshop der Analyse von Fahrzeugnutzungsdaten anhand eines Miniatur-Brennstoffzellenfahrzeugs auf einem Allrad-Rollenprüfstand. Dabei wurde untersucht, wie das Nutzerverhalten Faktoren wie Haltbarkeit und Leistungsfähigkeit eines Produkts beeinflusst. Die Teilnehmenden erfuhren unmittelbar, welchen Einfluss Fahrweise oder Karosserieform auf die Lebensdauer des Antriebsstrangs haben können, wodurch ein tiefgreifendes Verständnis für die Bedeutung der Nutzungsphase innerhalb zirkulärer Wertschöpfungssysteme vermittelt wird. Zum Abschluss des Workshops wurde eine im DIONA-Projekt entwickelte Simulation vorgestellt, die den Einfluss verschiedener Zirkularitätsparameter verdeutlicht und gleichzeitig zeigt, welche Rolle digitale Methoden bei der Gestaltung nachhaltiger Systeme spielen.



Abbildung 44: Angeregter Austausch am Komponenten-Tisch während eines Grundlagen-Workshops (Fotograf: Georgiy Kupenskiy)



Abbildung 45: Mögliche Dichtungskonzepte zum Anfassen und selbst montieren

2. Wertschöpfung in der Kreislaufwirtschaft: Geschäftsprozesse und digitale Technologien

Dieser Workshop adressiert Teilnehmende mit ersten Vorkenntnissen und verfolgt das Ziel, Kompetenzen im Bereich der Prozessanalyse und -gestaltung auszubauen. Im ersten Teil werden die theoretischen Grundlagen und die Bedeutung von Geschäftsprozessen für nachhaltige Wertschöpfung erörtert. Im zweiten Teil wird eine explorative Methode zur Prozessgestaltung eingeführt und praktisch angewendet. Dadurch entwickeln die Teilnehmenden ein tieferes Verständnis für die Rolle digitaler Technologien in der Prozessoptimierung und erwerben praxisnahe Ansätze zur Anpassung von Geschäftsprozessen an Prinzipien der CE. Eine genauere Beschreibung des Workshopinhalts ist im Kapitel zu API.2 erklärt.

3. Wertvolle Kreisläufe: Geschäftsmodelle für die Kreislaufwirtschaft gestalten

Dieser Workshop richtet sich an Teilnehmende mit vertieften Interessen an strategischen Fragestellungen. Ziel ist es, die Kompetenz zur Entwicklung zukunftsfähiger Geschäftsmodelle auszubauen. Zunächst werden die zentralen Elemente eines Geschäftsmodells sowie deren strategische Bedeutung erläutert. Anschließend werden zirkuläre Strategien vorgestellt und praxisnah veranschaulicht. Im zweiten Teil wenden die Teilnehmenden eine Methode zur Entwicklung eigener Geschäftsmodelle an, wodurch sie in die Lage versetzt werden, konkrete, zirkuläre Geschäftsmodelle selbstständig zu konzipieren und kritisch zu reflektieren.

Die Workshops sind didaktisch so gestaltet, dass sie aufeinander aufbauen und unterschiedliche Kompetenzstufen abdecken – von der reinen Wissensvermittlung bis hin zur aktiven Anwendung und Reflexion. Sie nutzen interaktive Methoden, Visualisierungen und digitale Werkzeuge, um den Wissenstransfer nachhaltig zu unterstützen.

Ein weiterer Mehrwert ergibt sich aus der Integration der Workshops in bestehende akademische Lehrformate. So wurden die Konzepte bereits erfolgreich in Lehrveranstaltungen eingebunden. Auf diese Weise profitieren Studierende direkt von den im CPL entwickelten Inhalten, wodurch nicht nur theoretisches Wissen vermittelt, sondern auch praxisnahes Lernen ermöglicht wird. Darüber hinaus wurde das Workshopkonzept erfolgreich auf Messe- und Tagungsformate übertragen und dabei jeweils an die Bedürfnisse und das Vorwissen der spezifischen Zielgruppen angepasst. Damit tragen die entwickelten Formate sowohl zur wissenschaftlichen Weiterbildung als auch zur breitenwirksamen Dissemination der Projektergebnisse bei.

5.3.2 Herausforderungen

Beworben wurden die Workshops sehr breit, abgesehen von der MobilKreis-Website, welche zugleich die Anmeldeseite für die Workshops enthielt, wurden verschiedene Kanäle genutzt. Dazu zählen LinkedIn, Mail-Verteiler und persönliche Ansprachen, aber auch Empfehlungen unterschiedlicher

Institutionen. So wurden die Workshops beispielsweise vom Projektträger Karlsruhe, dem Bundesministerium für Forschung, Energie und Raumfahrt, dem Innovationscluster Circular Saxony e.V., dem Innovationscluster HZwo e.V. und etlichen Weiteren bekannt gemacht. Dennoch war das Feedback verhalten und es stellte sich heraus, dass insbesondere Direktansprachen und Veranstaltungen, die in einen größeren Kontext eingebunden waren, wie die digitale Woche in Dortmund, für höhere Anmeldezahlen sorgten.

Bei der Umsetzung der Workshops traten Herausforderungen in Bezug auf die Zuverlässigkeit der Teilnehmenden auf. Mehrere angemeldete Personen erschienen zu den vereinbarten Terminen nicht, ohne sich im Vorfeld abzumelden oder eine Begründung mitzuteilen. Zudem kam es vor, dass Teilnehmende sich für alle drei angebotenen Workshops registrierten, letztlich jedoch nur an einem Termin teilnahmen. Diese unvorhersehbaren Ausfälle erschwerten die Planung und Durchführung erheblich, da sowohl die Gruppendynamik als auch die inhaltliche Kontinuität der Workshops darunter litten. Aus diesen Gründen wurde die im Vorfeld der Workshops verschickte Onboarding-Mail angepasst. Bei der eigentlichen Durchführung der Workshops zeigte sich jedoch ein hohes Motivationsniveau der Teilnehmenden. Dieses wurde durch eine sukzessive Erhöhung der interaktiven Elemente in den Workshops genutzt.

5.3.3 Weiterentwicklung des CPL und der Workshops

Die Workshops zur CE wurden im Laufe der Zeit zunehmend digitalisiert, um eine breitere Zielgruppe zu erreichen und neue, interaktive Lernformen zu ermöglichen. Ein zentrales Element dieser Entwicklung war die Digitalisierung der Komponententische, insbesondere des Tisches, der die 10R-Strategien der CE anschaulich erklärt. Ursprünglich als physisches Lerninstrument konzipiert, wurde der Komponententisch in ein interaktives Online-Format überführt. Dadurch können Teilnehmende nun ortsunabhängig die verschiedenen R-Strategien kennenlernen, die praxisnah insbesondere mit Beispielen aus den MobilKreis-Verbundprojekten verknüpft sind. Ein weiteres Tool sind beispielsweise die Miro-Boards (siehe Abbildung 46), die es auch in einer Online-Umgebung ermöglichen, kooperativ Ideen zu entwickeln, wie es zuvor mit Hilfe von Flipcharts geschehen ist.

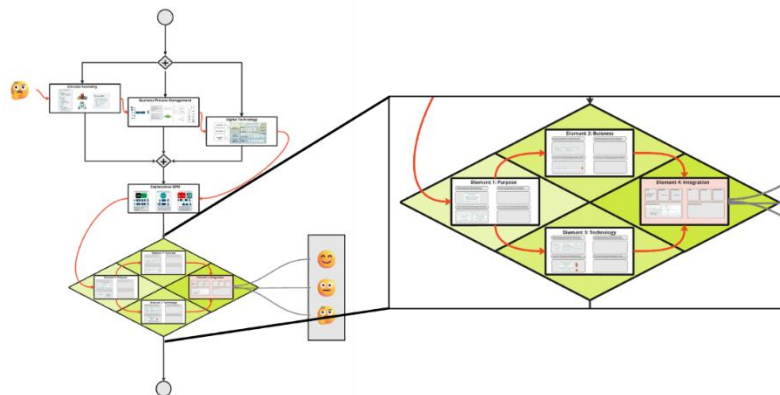


Abbildung 46: Beispielhafter Auszug aus einem Miro-Board zum Workshop „Wertschöpfung in der Kreislaufwirtschaft“

Zusätzlich wurde eine Landkarte mit 360° Touren durch die Labore der Verbundprojekte mit integrierten Informationspunkten realisiert (verfügbar unter <https://mobilkreis360.de/>), um die Ergebnisse der einzelnen Projekte ortsunabhängig und niederschwellig zur Verfügung zu stellen (siehe Abbildung 47).

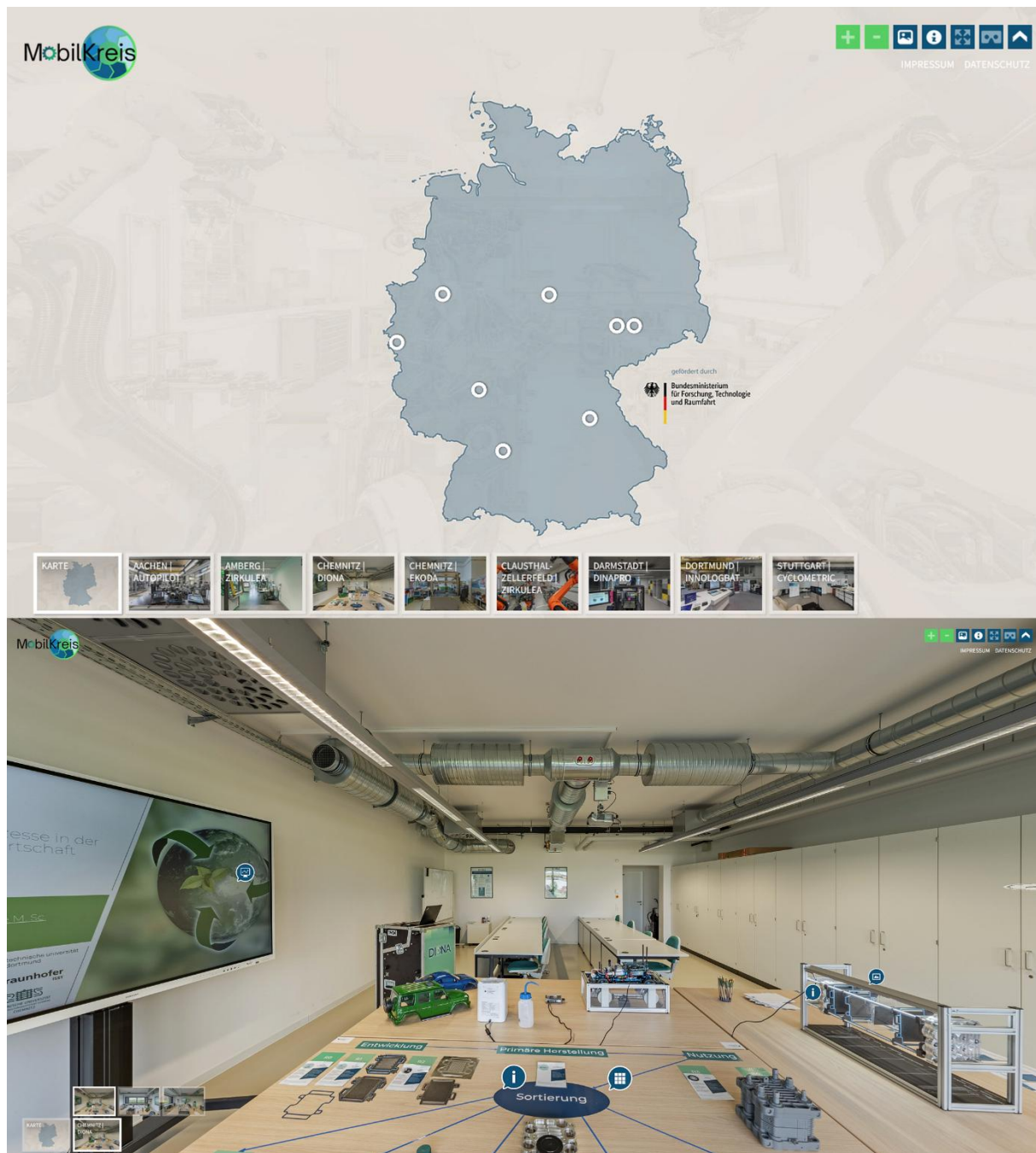


Abbildung 47: Das cyberphysische Labor an der TU Chemnitz als Beispiel für die digitale 360° Umsetzung der MobilKreis-Projekte

Das Labor in Chemnitz wurde zudem mit 5 Virtual-Reality-Brillen sowie einem leistungsfähigen Rechner für virtuelle Anwendungen ausgestattet, die eine immersive Nutzung der 360°-Touren ermöglichen. Workshopteilnehmende können dadurch anstelle von Besuchen in acht deutschlandweit verteilten Laboren eine virtuelle, nachhaltigere und kostengünstigere Alternative erproben. Um Workshops nicht ausschließlich digital oder ausschließlich in Präsenz durchführen zu müssen, sondern hybride Formate zu ermöglichen, wurde zusätzlich eine 360°-Meetingkonferenzkamera sowie ein interaktiver Beamer beschafft. Diese Ausstattung erlaubt es virtuellen und vor Ort anwesenden Teilnehmenden, gemeinsam und kollaborativ an Workshopaufgaben und -inhalten zu arbeiten. Die Laborausstattung wurde in der letzten Workshopreihe eingesetzt, um diese vollständig hybrid durchzuführen. Zur spielerischen Wissensüberprüfung wurde ergänzend ein digitales Memory-Spiel entwickelt, das durch anwesende und virtuelle Teilnehmer gespielt werden kann. Dieses vermittelt die Inhalte der 10R-Strategien auf unterhaltsame Weise und unterstützt die Teilnehmenden dabei, ihr Wissen zu festigen.

5.3.4 Auswertung der Workshops

Basierend auf dem direkten Feedback des Forschungsgebiets Techniksoziologie, einer Videoauswertung und einer standardisierten Vor- und Nachbefragung wurden die Workshops konstant weiterentwickelt und konnten an inhaltlicher und operativer Qualität gewinnen. Für die Videoauswertung wurden Videos der drei Workshops aufgenommen und in der AP4-Gruppe zusammen ausgewertet und Feedback abgeleitet. Für die Evaluierung mittels Fragebögen wurde sich an einem standardisierten Vorgehen anderer Befragungen orientiert (vgl. Dagenais et al. 2011, Kumar et al. 2019). Es wurden zwei Befragungen entwickelt, welche zwar auf geringen Teilnehmerzahl nicht repräsentative Ergebnisse produziert haben, aber einen guten Überblick über die Herkunft der Teilnehmerinnen und Teilnehmer sowie deren Wissen über die CE und deren Technologienutzung ermöglichen. Die Vorbefragung beinhaltete unter anderem Fragen zur Unternehmensgröße und Unternehmensumsatz der Teilnehmenden, der Hauptgrund für die Teilnahme an den Workshops und dem bisherigen Verständnis der CE und ob und welche CE-Strategien schon angewendet werden. Zudem wurden in Absprache mit den restlichen Mitgliedern des APs gefragt ob bestimmte Schlüsseltechnologien und Datenquellen bereits genutzt werden (z. B. Chatbots, Augmented Reality, Digitale Zwillinge etc.) oder ob es zukünftig eine Nutzungsabsicht besteht.

Die Nachbefragung der Workshops zielte hingegen vielmehr auf die Evaluierung des Workshops ab und beinhaltete daher Fragen ob die Inhalte der Workshops die Erwartungen erfüllt haben, ob die vorgestellten Konzepte für die Teilnehmenden neu und anwendbar waren. Weiterhin wurde gefragt, ob die genutzten Methoden und der Umfang der Workshops angemessen waren und ob die Workshop-Präsentierenden motiviert und kompetent aufgetreten sind. Final wurde gefragt, ob das Konzept der CE besser verstanden wurden und die Teilnehmenden sich vorstellen eine CE-Strategie zukünftig anzuwenden.

Ergebnisse Vorbefragung

Um einen Eindruck über die unternehmerische Herkunft und den Kenntnisstand der Teilnehmenden zu gewinnen, wurde eine Vorbefragung der Workshops durchgeführt. Hierzu wurde allen Teilnehmenden vor Beginn der Befragung ein entsprechender Link per E-Mail zugesandt. Insgesamt wurden 11 Fragebögen vollständig ausgefüllt. Diese erlaubten keine quantitative Korrelationsrechnung, halfen aber, qualitativ den Kenntnisstand der Workshop-Teilnehmenden zu evaluieren.

Insgesamt konnte eine heterogene Stichprobe hinsichtlich Unternehmensgröße und Unternehmensumsatz gewonnen werden: Drei der Befragten stammten aus Unternehmen mit weniger als neun Mitarbeitenden. Ebenso waren drei Befragte in Unternehmen tätig, die einen Umsatz von weniger als 2 Millionen Euro erzielten. Ein Teilnehmer kam aus einem Unternehmen mit 50-250 Mitarbeitenden und 5 Befragte stammten aus einem Unternehmen mit mehr als 250 Mitarbeitenden. Zwei weitere Teilnehmende stammten zudem aus einem Unternehmen mit einem Umsatz von 10-50 Millionen Euro und zwei Teilnehmende stammten aus einem Unternehmen mit mehr als 50 Millionen Euro Umsatz.

Die Hauptgründe für die Teilnahme an den Workshops waren vielfältig. Viele Teilnehmende wollten ihr Wissen erweitern und sich persönlich weiterbilden, insbesondere im Bereich der CE. Sie interessierten sich sowohl für das Thema selbst als auch für dessen Potenzial als Alternative zum kapitalistischen Marktmodell. Ein weiterer zentraler Aspekt war der Wunsch, zu verstehen, wie sie mit ihrem Unternehmen zu einer nachhaltigeren und effizienteren Produktion beitragen können. Darüber hinaus schrieben die Teilnehmenden dem Erfahrungsaustausch und der Vernetzung große Bedeutung zu, um neue Perspektiven zu gewinnen und den Blick über den eigenen fachlichen Horizont hinaus zu erweitern. Einige brachten bereits eigene Berührungspunkte zur CE mit und suchten gezielt nach neuen Impulsen und Ideen. Auf die Frage, ob die Teilnehmenden bereits mit dem Konzept der CE vertraut sind, zeigte sich ein zweigeteiltes Bild (siehe *Abbildung 48*): Drei Befragte gaben an, mit dem Konzept wenig vertraut zu sein, während vier Befragte angaben, eher mit dem Konzept vertraut zu sein.

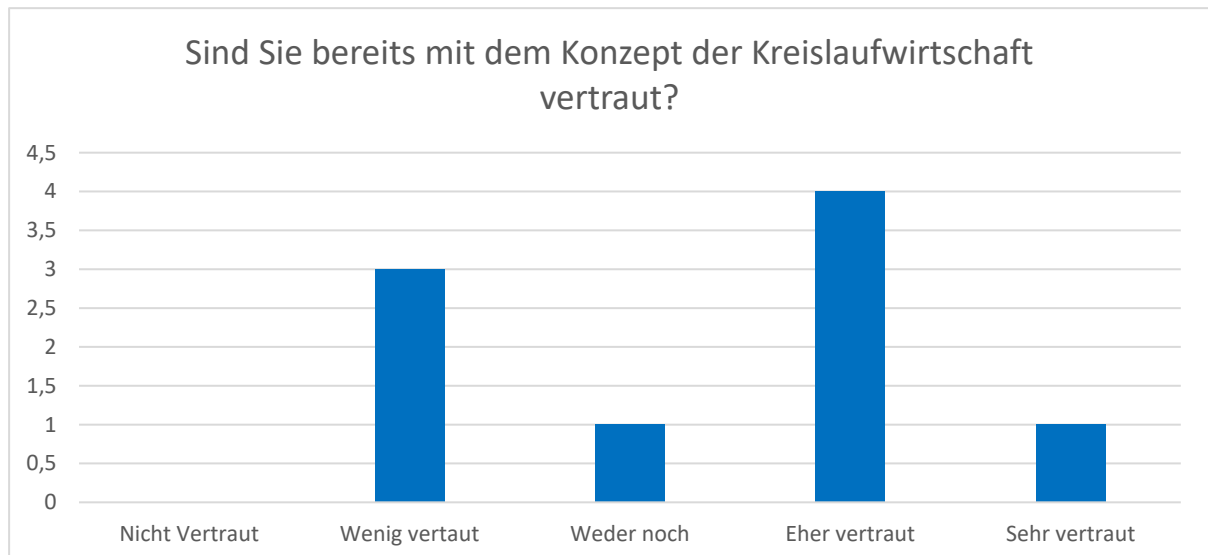


Abbildung 48: Vertrautheitsgrad der Workshop-Teilnehmenden mit dem Konzept der Kreislaufwirtschaft

Hinsichtlich der angewandten CE-Strategien zeigt sich ein ähnliches Bild (siehe Abbildung 49) wie in der Studie von Isopp et al. (2024): Insbesondere die linear anschlussfähigen Strategien Reduce und Recycle werden am meisten angewandt. In einer Vorbefragung der Workshops wurde angegeben, dass insbesondere auch die Strategien Reuse und Repair angewandt werden.

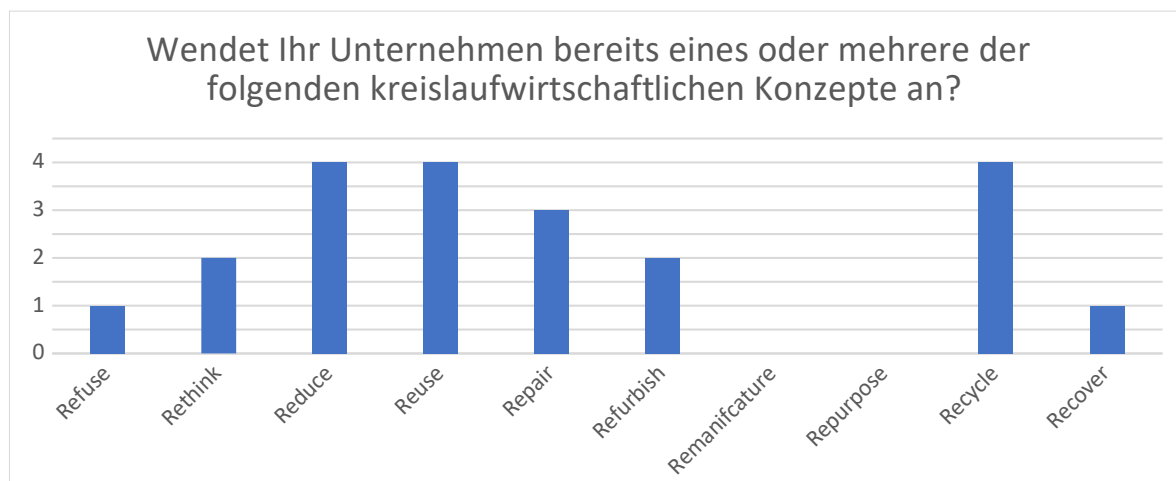


Abbildung 49: Angewandte R-Strategien der Unternehmen der Teilnehmenden

Hinsichtlich der Frage, welche CE-Themen von Interesse sind, zeigte sich ebenfalls ein heterogenes Bild: Einige Befragte zeigten besonderes Interesse an der Gestaltung und den Anforderungen an Produkte, insbesondere im Automobilbereich, mit dem Ziel, Produkte bereits bei ihrer Entwicklung CE-konform auszulegen. Prozesse und Digitalisierung sowie deren Verbindung zum Customer Service sind ebenfalls wichtige Aspekte. Auch die betriebliche Abfallentsorgung und mögliche Fallstricke werden als relevante Themen genannt. Für einige steht das gesamte Konzept der CE mit all seinen Prinzipien – den sogenannten "R's" – im Fokus. Es gibt jedoch auch Teilnehmende, die bisher keine spezifischen Erfahrungen mit CE-Themen haben und sich eine grundlegende Übersicht über die Thematik wünschen.

Die Befragten erhofften sich durch die Implementierung von CE-Maßnahmen in den Unternehmen diverse Vorteile: Einige Teilnehmende erhofften sich konkrete Vorteile, insbesondere Wettbewerbsvorteile, eine stärkere Marktposition und eine höhere Kosteneffizienz. Nachhaltigkeit spielte dabei eine zentrale Rolle: Viele wollten das Bewusstsein für nachhaltiges Handeln stärken, Unternehmensabläufe optimieren und einen verantwortungsvollen Umgang mit Ressourcen fördern. Für einige stand auch die Entwicklung eines nachhaltigen Geschäftsmodells im Vordergrund. Es gab jedoch auch Teilnehmende, die aktuell keine konkreten Pläne zur Implementierung solcher

Maßnahmen verfolgen oder lediglich beobachten wollten, wie andere Organisationen in diesem Bereich vorgehen.

Die von den Befragten genannten Barrieren bei der Umsetzung von CE-Maßnahmen in Unternehmen waren ebenfalls vielfältig: Viele Teilnehmende sahen festgefahrene Strukturen und das Festhalten an veralteten Denk- und Handlungsmustern als zentrale Hindernisse. Es wurde betont, dass es wichtig ist, das Interesse für nachhaltige Ansätze zu wecken, um Veränderungen anzustoßen. Auch externe Regelungen seitens der Kunden sowie die Herausforderung, Mindestanforderungen anders zu gestalten, wurden als Hürden genannt. Ein weiterer wesentlicher Punkt war die Profitorientierung vieler Unternehmen, bei der nachhaltige Maßnahmen häufig hinter wirtschaftlichen Interessen zurückstehen mussten. Zudem stellten monetäre Kosten-Nutzen-Abwägungen eine Barriere dar, da die finanziellen Vorteile oft nicht unmittelbar sichtbar sind.

Ergebnisse Nachbefragung

Im Gegensatz zur Vorbefragung welche aus diversen offenen Textfeld-Fragen bestand, bestand die Nachbefragung zum größten Teil aus Items mit einer 5er-Likert-Skala, um sowohl die Inhalte als auch die Präsentationstechnik und Methoden der Workshopgebenden möglichst zeiteffizient evaluieren zu können. Hierbei wurde nach jedem Workshop-Termin sowohl das Feedback basierend auf persönlichen Beobachtungen mit den Workshopgebenden geteilt, sowie die Zwischenergebnisse der Zwischenbefragung diskutiert. Insgesamt zeigten sich die Workshop-Teilnehmenden sehr zufrieden mit den Workshops. Wie der folgenden Abbildung zu entnehmen ist, entfielen sämtliche Bewertungen auf die Kategorien „eher zufrieden“ und „voll und ganz zufrieden“.

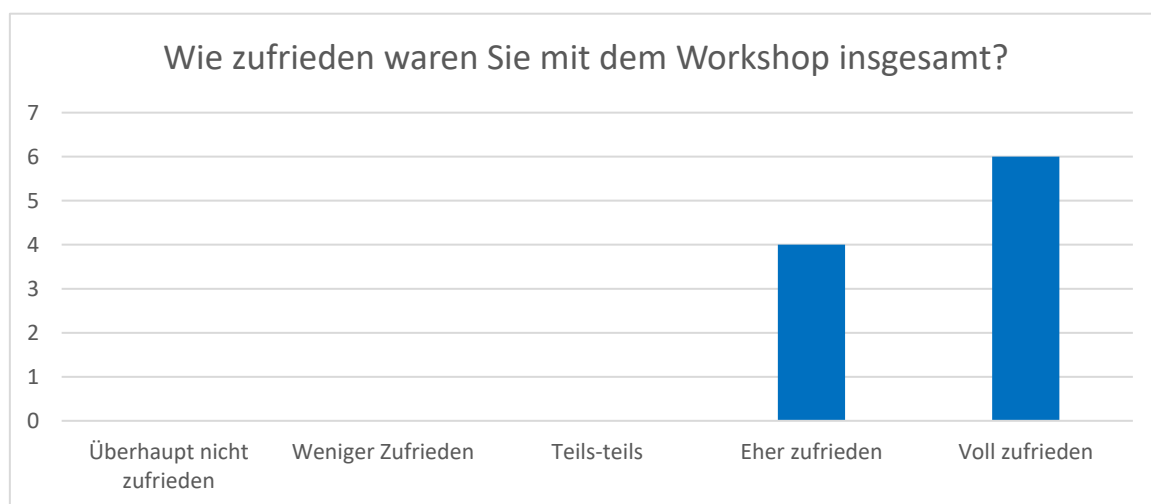


Abbildung 50: Nachbefragung Zufriedenheit mit den Workshops

Tabelle 23 zeigt hingegen die tiefergehenden, aggregierten Ergebnisse und insbesondere den Durchschnittswert. Je höher dieser Durchschnittswert ist, desto zufriedener waren die Teilnehmenden mit den einzelnen Aspekten des Workshops. In der Tabelle sind Items mit einem Durchschnittswert kleiner 4 gelb markiert und Werte größer 4 grün markiert. Grüne Felder bedeuten entsprechend der Skala, dass die Befragten eher oder sehr zustimmen, wohingegen gelbe Werte sich zwischen „teils-teils“ und „eher zustimmen“ bewegen. Dies bedeutet hingegen, dass die Ausprägung zwar schwächer bei den als bei den grünen Feldern ist, aber dass die Befragten trotzdem noch tendenziell zustimmen.

Hinsichtlich der Inhalte zeigten die Befragungsergebnisse, dass die Erwartungen vollständig erfüllt wurden, wenngleich das Konzept nicht für alle Teilnehmenden komplett neu war und nur ein Teil der Befragten tatsächlich neue Ansätze identifizieren konnte, um sie in ihren Beruf zu integrieren.

Hinsichtlich der Workshop-Konzeption bewerteten die Teilnehmenden sowohl die fachliche Ausgestaltung als auch die eingesetzten Methoden als sehr angemessen und sinnvoll. Ebenso wurde der Workshop nicht als überfrachtet wahrgenommen, sondern die vermittelte Menge an Informationen als sehr angemessen wahrgenommen.

Hinsichtlich der Moderation der Workshops zeigte sich ein äußerst positives Bild mit Bestwerten: Die Moderatoren verfügten über sehr gute Fachkenntnisse, vermittelten Informationen und Methoden

klar und verständlich und wirkten sehr motivierend. Hinsichtlich des Verständnisses der CE zeigt sich ein schwächeres, aber immer noch positives Bild: Der Workshop konnte einigen Teilnehmenden das Konzept der CE vermitteln. Er bot einigen Teilnehmenden Denkanstöße, um bspw. R-Strategien im Unternehmen und neue technische Lösungen als auch Geschäftsmodelle zu entwickeln. Insbesondere konnten aber auch neue Management- und Umsetzungsstrategien aufgezeigt werden.

Im Vergleich zeigte der Workshop die geringste Effektivität bei der Identifikation von Barrieren der CE in Unternehmen. Dennoch konnten insbesondere technische Herausforderungen sowie Herausforderungen im Zusammenhang mit Geschäftsmodellen erfolgreich vermittelt werden.

Zusammengefasst verdeutlicht die Nachbefragung der Workshops eine hohe Zufriedenheit der Teilnehmenden, wobei die Inhalte, Methoden und Moderation überwiegend positiv bewertet wurden. Die Erwartungen an die Inhalte wurden erfüllt, auch wenn das Konzept der CE nicht für alle neu war. Besonders hervorzuheben ist die Moderation, die durch Fachkenntnis, klare Kommunikation und Motivation Bestwerte erzielte. Der Workshop vermittelte Denkanstöße zu R-Strategien sowie technischen Lösungen und Geschäftsmodellen, zeigte jedoch weniger effektiv konkrete Barrieren der CE auf.

Tabelle 23: Ergebnisse der Nachbefragung

	N	Mittelwert	Std.- Abweichung
Der Inhalt des Workshops hat meine Erwartungen erfüllt.	10	4,60	0,699
Die vorgestellten Konzepte und Ideenansätze des Workshops waren für mich neu.	10	3,50	1,080
Der Workshop hat mir neue Ansätze aufgezeigt, die ich in meinem Beruf nutzen kann.	9	3,67	1,000
Die fachliche Tiefe des Workshops war angemessen.	10	4,60	0,516
Die genutzten Methoden des Workshops fand ich sinnvoll.	10	4,50	0,527
Die Menge an Informationen fand ich angemessen.	10	4,40	0,699
Die Moderator:innen kannten sich die mit den Inhalten des Workshops aus.	10	4,90	0,316
Die Aufgaben und Methoden wurden klar kommuniziert.	10	4,70	0,949
Die Moderator:innen waren motivierend.	10	5,00	0,000
Der Workshop hat mir geholfen das Konzept der CE besser zu verstehen.	10	3,90	0,876
Durch den Workshop kann ich mir zukünftig vorstellen eines der 9R Konzepte in meiner Firma umzusetzen.	9	3,67	1,000
Mir hat der Workshop neue Chancen für mein Unternehmen aufgezeigt.	9	3,89	1,054
Mir hat der Workshop neue technische Chancen/Möglichkeiten in der Umsetzung der CE aufgezeigt.	9	3,78	0,833
Mir hat der Workshop neue Geschäftsmodellmöglichkeiten der CE aufgezeigt.	9	3,89	1,167
Mir hat der Workshop neue Management- und Umsetzungsstrategien aufgezeigt.	9	4,11	0,601
Der Workshop hat mir neue Barrieren für mein Unternehmen aufgezeigt.	9	3,44	0,726
Der Workshop hat mir die technischen Herausforderungen aufgezeigt, die bei der Umsetzung der CE in meinem Unternehmen zu bewältigen sind.	9	3,78	0,833
Der Workshop hat mir neue Herausforderungen im Bereich meines Geschäftsmodells für mein Unternehmen in der CE aufgezeigt.	9	3,78	0,667
Der Workshop hat mir die bestehenden Barrieren im Bereich des Managements bei der Umsetzung der CE verdeutlicht.	10	4,20	0,422

5.3.5 Fazit und Ausblick

Im AP4 wurde erfolgreich ein CPL entwickelt und in unterschiedlichen Formaten für den Wissenstransfer zu Themen der CE aus der Wissenschaft in die Industrie genutzt. Dabei hat sich die zielgruppenorientierte Anforderungsanalyse im Verlauf des Projekts als essenziell erwiesen, um die spezifischen Bedürfnisse der Teilnehmenden zu identifizieren und maßgeschneiderte Inhalte zu entwickeln. Insbesondere die Verknüpfung der digitalen und analogen Welt stellte eine Hauptaufgabe dar und bietet enormes Potenzial für fertigende Unternehmen. Die Umsetzung dieser Verbindung ermöglicht nicht nur die praxisnahe Vermittlung komplexer Konzepte, sondern bildet auch eine Grundlage für den Anstoß der Transformation von KMU hin zur CE. Das CPL hat sich dabei als effektives Werkzeug herausgestellt, das einen niederschweligen Einstieg in zirkuläre Wertschöpfungssysteme sowie den Einsatz digitaler Technologien bietet. Es schafft Raum für innovative Ansätze und fördert den Wissenstransfer durch interaktive Formate.

Die Gewinnung von Workshopteilnehmenden stellte sich als anspruchsvoll heraus und erforderte gezielte Kommunikationsmaßnahmen sowie direkte Ansprache potenzieller Interessenten. Dennoch waren die Workshops ein Erfolg, nicht zuletzt aufgrund ihrer kontinuierlichen Weiterentwicklung, sowohl inhaltlich als auch methodisch. Die hohe Zufriedenheit der Teilnehmenden unterstreicht den Mehrwert dieser Formate. Besonders hervorzuheben sind dabei die Stärken des CPL: Der mobile Einsatz vor Ort oder in rein digitalen Formaten erhöht die Flexibilität erheblich, zudem ermöglicht der modulare Aufbau eine fortlaufende Optimierung entsprechend der Bedürfnisse verschiedener Zielgruppen.

Für die Zukunft bietet das CPL vielseitige Möglichkeiten zur Weiterentwicklung und Nutzung. So ist eine Integration in akademische Lehrveranstaltungen vorgesehen, um Studierenden praxisnahes Wissen über CE zu vermitteln. Darüber hinaus könnte das Labor im Rahmen zukünftiger Projekte weiter ausgebaut werden, um neue Technologien und Methoden einzubinden sowie zusätzliche Anwendungsszenarien abzudecken. Ein weiterer vielversprechender Ansatz besteht darin, Zertifikatskurse zu entwickeln oder bestehende Kurse mit Inhalten aus dem CPL anzureichern, ein Vorhaben, das bisher aus Budget- und Zeitgründen nicht realisiert werden konnte, aber bereits durch die Erarbeitung von entsprechenden Konzepten vorbereitet wurde. Schließlich bietet das Konzept des CPL auch großes Potenzial für individualisierte Anwendungen in einzelnen Unternehmen: Durch maßgeschneiderte Anpassungen können spezifische Herausforderungen adressiert werden, was insbesondere KMU bei ihrer Transformation hin zu nachhaltigen Geschäftsmodellen unterstützen kann.

6 Transfer und Vernetzung

6.1 Transferkonzept

Für Unternehmen stellt Wissen eine entscheidende Ressource für die Entwicklung nachhaltiger Wettbewerbsvorteile dar (Crupi et al. 2020). Im Kontext des Forschungsbegleitvorhabens DIONA, das die CE in der Automobilindustrie adressiert, kommt dem Transfer von Forschungsergebnissen eine besondere Bedeutung zu. Die Herausforderungen, die sich aus dem Verbrauch natürlicher Ressourcen ergeben, erfordern innovative Ansätze, um Wissen zu nachhaltigeren Praktiken in der Automobilindustrie zu implementieren und gleichzeitig wirtschaftlichen Erfolg zu erzielen. Ein effektiver Ergebnistransfer soll dazu beitragen, die im Rahmen der Förderbekanntmachung „MobilKreis“ gewonnenen Erkenntnisse in die Praxis zu überführen und so den Sektor auf dem Weg zu einer ressourceneffizienten Zukunft zu unterstützen.

In Anlehnung an (Arvanitis et al. 2008) wird Wissenstransfer als Gesamtheit aller Aktivitäten verstanden, die auf die Übertragung von Wissen und Technologie abzielen und dazu beitragen, die Aktivitäten eines Unternehmens oder einer Forschungseinrichtung weiterzuentwickeln. Dabei ist zwischen Wissen und Technologie als zwei komplementäre Konzepte zu differenzieren. Während der Technologietransfer primär auf die praktische Anwendung spezifischer Erzeugnisse, technischer Verfahren oder Geräte abzielt und vorwiegend explizites Wissen vermittelt, greift der allgemeine Wissenstransfer deutlich weiter. Im Fokus stehen hier der Austausch von Know-how, individuellen Erfahrungen und Ideen zwischen Personen oder Institutionen, wobei ein entscheidendes Unterscheidungsmerkmal im Grad der Artikulierbarkeit der transferierten Inhalte liegt (Gopalakrishnan und Santoro 2004). Gerade das Erfahrungswissen, das oft tief in den Köpfen der beteiligten Personen verankert ist und primär durch praktisches Erproben entsteht, stellt eine besondere Herausforderung für den Transfer dar.

Der Transfer wird in der Literatur häufig als Prozess beschrieben, der aus einer Reihe aufeinanderfolgender Handlungen besteht (Szulanski 2000). Dieser Prozess vollzieht sich sowohl intraorganisational über das Erleben und Sammeln von Erfahrungen als auch interorganisational über den gezielten Austausch von Erfahrungen. Rauter (2013) liefert einen Ansatz, diesen Prozess modellhaft zu beschreiben. Das Modell geht über den reinen Kernvorgang hinaus und bezieht explizit Phasen vor und nach dem eigentlichen Transfer ein. Die Modellierung zeichnet eine dynamische, nicht-sequenzielle Prozessführung mit gezielten Prüfpunkten, an denen über die Erfüllung notwendiger Voraussetzungen sowie über einen möglichen Abbruch oder den Übergang in die nächste Phase entschieden wird. Strukturell gliedert sich der Prozess in die Initiierung, in der festgelegt wird, welche Wissensinhalte in welchem Umfang und in welcher Form übertragen werden sollen, den eigentlichen Transfer expliziter und impliziter Wissensbestände sowie die Integration des transferierten Wissens in die bestehende Wissensbasis. Ergänzt wird der Ablauf durch einen Prolog und einen Epilog, die sämtliche Aktivitäten der Vor- und Nachbereitung bündeln (Rauter 2013).

Diese theoretische Rahmung bildete die Grundlage für das Transferkonzept von DIONA, das einen

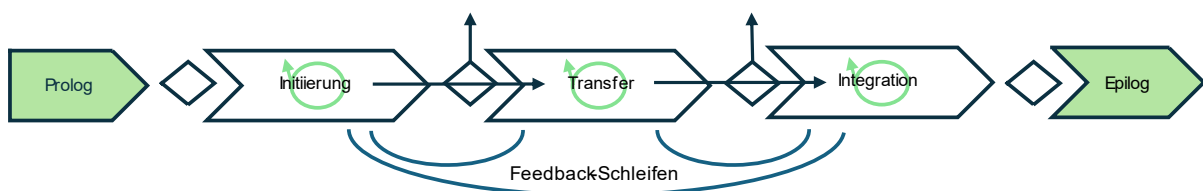


Abbildung 51: Prozess des Wissenstransfers in Anlehnung an (Rauter 2013)

ganzheitlichen Ansatz verfolgte: den Zugang zu Wissen fördern, die Übertragbarkeit in die Praxis sicherstellen, Synergien zwischen Verbundprojekten schaffen und einen strukturierten Dreisprung für den externen Transfer ermöglichen. Das Transferkonzept ist in Abbildung 51 dargestellt.

Strategien des Wissenstransfers und ihre Umsetzung in DIONA

Zur Förderung des Wissenstransfers lassen sich im Wesentlichen zwei strategische Ansätze unterscheiden: die Kodifizierungs- und die Personalisierungsstrategie (Hansen et al. 1999; Thiel 2002). Bei der Kodifizierungsstrategie steht die systematische Speicherung von Wissen in Datenbanken im Vordergrund, um eine breite und unkomplizierte Nutzung zu gewährleisten. Ziel ist die mehrfache Wiederverwendung einmal generierter Inhalte. Im Gegensatz dazu rückt die Personalisierungsstrategie den direkten Austausch zwischen Individuen in den Mittelpunkt. Dieser Prozess basiert auf persönlichen Netzwerken und dem Kontakt zu Experten, wobei Informationen nicht einfach kopiert, sondern spezifisch an die jeweiligen Bedürfnisse angepasst werden.

Im Rahmen von DIONA wurden beide Strategien bewusst kombiniert. Die Kodifizierungsstrategie fand ihren Ausdruck insbesondere im MobilKreis Digital Hub, der als zentrale Plattform zur Sammlung, Aufbereitung und Bereitstellung von Forschungsergebnissen konzipiert wurde. Der Hub fungierte als Anlaufstelle und Innovationszentrum für relevante Akteure aus Wissenschaft, Wirtschaft, Verbänden und Gremien. Wesentliche Erkenntnisse aus den geförderten Verbundprojekten wurden hier zusammengeführt und der Zielgruppe zugänglich gemacht. Darüber hinaus dienten wissenschaftliche und praxisnahe Publikationen als kodifizierte Transferinstrumente, die Erkenntnisse, Methoden und Schlussfolgerungen einem breiten Publikum zugänglich machten.

Die Personalisierungsstrategie wurde vor allem durch die vielfältigen Veranstaltungsformate realisiert, die den direkten Austausch zwischen den Akteuren in den Mittelpunkt stellten. Regelmäßige Transfertreffen, Tagungen, Working Groups und Workshops bildeten das Rückgrat dieser Strategie und ermöglichten den Austausch impliziten Wissens, das sich nur begrenzt in kodifizierter Form vermitteln lässt. Die Personalisierungsstrategie weist dabei den Vorteil einer natürlichen Motivationslage der Beteiligten durch den direkten Austausch auf, wobei die Skalierbarkeit aufgrund der individuellen Aufbereitung begrenzt bleibt (Hansen et al., 1999; Thiel, 2002). Durch die Kombination beider Ansätze konnte DIONA sowohl eine breite Reichweite als auch eine tiefgehende Wissensvermittlung erzielen.

Ergänzend zur strategischen Ausrichtung wurde im Transferkonzept das Push- und Pull-Prinzip berücksichtigt. Das Push-Prinzip wurde durch gezielte Kommunikationsmaßnahmen über LinkedIn, die Projektwebsite und den Digital Hub umgesetzt, um relevante Stakeholder proaktiv über Forschungsergebnisse zu informieren. Das Pull-Prinzip wurde durch die Schaffung offener Zugänge zu Wissensressourcen und die Einbindung der Stakeholder in die Gestaltung des Hubs adressiert. Insbesondere im interorganisationalen Austausch kann ein mangelndes Problembewusstsein dazu führen, dass Wissen aktiv herangetragen werden muss. In der Gesamtbetrachtung erwies sich die Kombination beider Prinzipien als besonders effektiv (Thiel, 2002; Rauter, 2013).

Interner Transfer innerhalb des MobilKreises.

Der interne Ergebnistransfer zielte darauf ab, den Zugang zu relevantem Wissen innerhalb des MobilKreises zu schaffen und zu erleichtern. Dies beinhaltete die Identifikation und Einbindung von Schlüsselakteuren der Verbundprojekte, um auf die informationellen Bedürfnisse eingehen zu können. Zentral war die Schaffung von Synergien zwischen den verschiedenen Verbundprojekten, wobei durch den Austausch von Erfahrungen, Erkenntnissen und bewährten Praktiken eine kooperative Umgebung gefördert wurde. Aufgrund der zeitlich versetzten Laufzeiten der Projekte war zu erwarten, dass insbesondere die Projekte der Tranche 2 von Erkenntnissen der Tranche 1 profitieren konnten. Ein weiteres Ziel war die Entwicklung neuer Projektideen für künftige Forschung zwischen den Teilnehmern der Verbundprojekte.

Die theoretische Fundierung dieses Ansatzes findet sich im Konzept der Absorptionsfähigkeit und der organisationalen Offenheit. Auf individueller Ebene sind die Diffusionsfähigkeit des Senders und die Absorptionsfähigkeit des Empfängers von zentraler Bedeutung für den Transfererfolg (Thiel, 2002). Auf organisationaler Ebene können unterschiedliche Deutungsmuster, die tief in der jeweiligen Organisationskultur verwurzelt sind, den Austausch erschweren. Maßgeblich ist die Offenheit der Kultur, die sich in der Bereitschaft zeigt, fremde Deutungsmuster zu prüfen und bei Eignung zu übernehmen (Thiel, 2002). Die Transfertreffen und Working Groups von DIONA wurden explizit mit dem Ziel gestaltet, diese kulturelle Offenheit zwischen den heterogenen Verbundprojekten zu fördern und organisatorische sowie fachliche Distanzen abzubauen. Eine geringe organisatorische, physische sowie fachliche Distanz wirkt sich nachweislich positiv auf den erfolgreichen Transfer aus (Salmi und Torkkeli 2009).

Externer Transfer außerhalb des MobilKreises

Der Transfer von Ergebnissen nach extern wurde als Dreisprung konzipiert: Informieren, Involvierern und Integrieren. In der Informationsphase wurden relevante Stakeholder über die Forschungsergebnisse in Kenntnis gesetzt, wobei klare und verständliche Kommunikationsstrategien zum Einsatz kamen. In der Involvierungsphase wurden die Stakeholder aktiv in den Transferprozess einbezogen, um sicherzustellen, dass ihre Bedürfnisse und Erwartungen berücksichtigt werden. Die abschließende Integrationsphase zielte auf die nachhaltige Einbettung der Ergebnisse in die Praxis.

Dieser Dreisprung lässt sich theoretisch im Prozessmodell von Rauter (2013) verorten: Die Informationsphase korrespondiert mit der Initiierung und dem Prolog des Transferprozesses, in denen Wissensinhalte identifiziert und kommunikativ vorbereitet werden. Die Involvierung entspricht dem eigentlichen Transferkern, in dem der Austausch expliziter und impliziter Wissensbestände zwischen den Akteuren stattfindet. Die Integration wiederum spiegelt die abschließende Phase der Wissensintegration in die bestehende Basis der aufnehmenden Organisation wider. Die Informationsreichtlichkeit der gewählten Transfermethoden spielte hierbei eine wesentliche Rolle: Personalisierte Kommunikationsformen wie Tagungen und Workshops wiesen eine deutlich höhere Reichtlichkeit auf als rein dokumentenbasierte Verfahren, da sie ein tieferes gegenseitiges Verständnis zwischen Sender und Empfänger ermöglichten (Thiel, 2002).

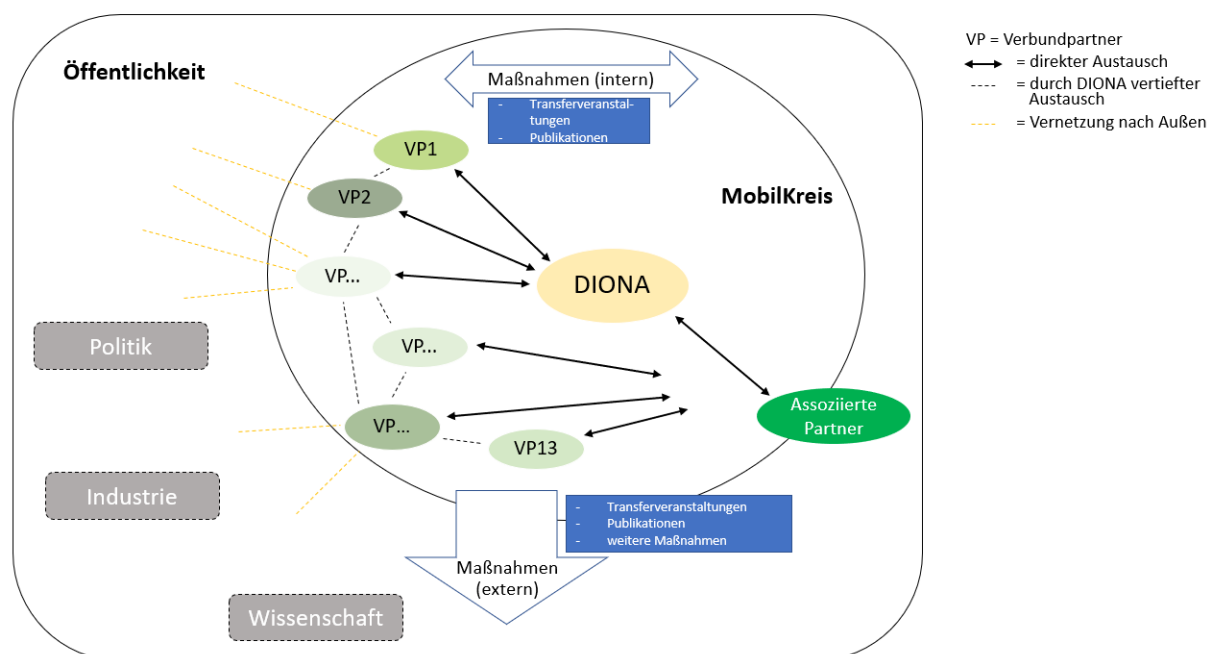


Abbildung 52: Positionierung DIONA

Stakeholderanalyse und zielgruppenorientierter Transfer

Im Rahmen des Ergebnistransfers wurde eine Stakeholderanalyse durchgeführt, bei der zwischen internen und externen Stakeholdern unterschieden wurde. Als externe Stakeholder wurden verschiedene Organisationen und Strukturen außerhalb der geförderten MobilKreis-Projekte identifiziert, die in drei Hauptgruppen unterteilt werden können: Industrie, Wissenschaft und Politik. Darüber hinaus wurden hybride Stakeholder identifiziert, die Merkmale mehrerer Gruppen aufweisen und sich nicht eindeutig in dieses Schema einordnen lassen. Intern standen die 13 Verbundprojekte des MobilKreises als zentrale Stakeholder im Fokus.

Die Stakeholderanalyse stellte sicher, dass die Übertragung von Erkenntnissen auf die Bedürfnisse und Anforderungen der relevanten Akteure ausgerichtet war. Aus theoretischer Sicht ist die Berücksichtigung der Empfängerseite ein wesentlicher Erfolgsfaktor des Wissenstransfers. Die Lernfähigkeit von Individuen wird einerseits durch die allgemeine Denkfähigkeit und andererseits durch das bereits vorhandene Vorwissen beeinflusst. Personen mit detaillierten Kenntnissen in einem spezifischen Bereich verfügen tendenziell über eine höhere Kapazität, neues Wissen aufzunehmen (Thiel, 2002). Um dieser Heterogenität Rechnung zu tragen, wurden auf Basis der Stakeholderanalyse Personas entwickelt, die als fiktive Charaktere die wichtigsten Merkmale und Bedürfnisse der

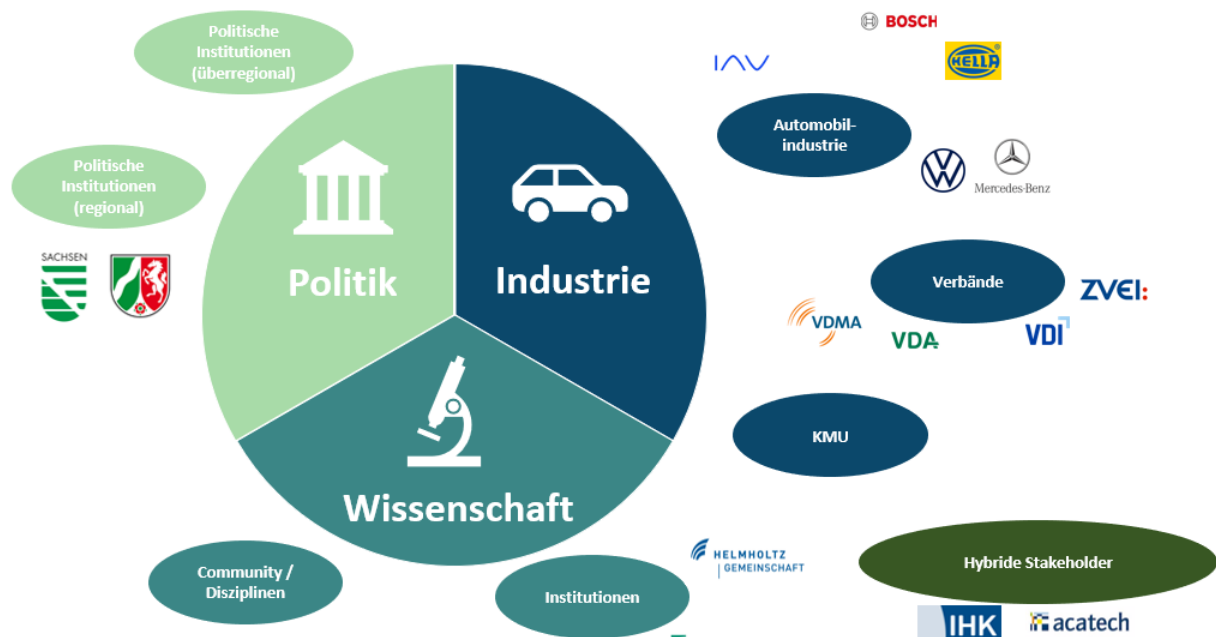


Abbildung 53: Überblick Stakeholder DIONA

tatsächlichen Zielgruppen abbilden. Diese vereinfachten Personas dienten als Grundlage für eine zielgruppengerechte Ansprache und wurden im Projektverlauf kontinuierlich angepasst und spezifiziert.

Transferinstrumente und ihre theoretische Einordnung

In der wissenschaftlichen Betrachtung von Transfermethoden lässt sich ein Kontinuum heranziehen, das verschiedene Instrumente zwischen zwei Extrempunkten einordnet: stark personalisierte Methoden wie die direkte Face-to-Face-Kommunikation auf der einen Seite und stark kodifizierte Ansätze wie reine Textdokumente auf der anderen. Ein wesentliches Unterscheidungsmerkmal ist dabei die Eignung für verschiedene Wissensarten. Während kodifizierte Instrumente primär der Vermittlung expliziten Wissens dienen, erfordert der Austausch impliziten Wissens Methoden mit hoher Informationsreichhaltigkeit, die in der Lage sind, Ambiguitäten effektiv zu reduzieren (Thiel, 2002). Die im DIONA-Transferkonzept eingesetzten Instrumente lassen sich entlang dieses Kontinuums verorten.

Transfertreffen und Speeddating

Die virtuellen MobilKreis-Transfertreffen bildeten als regelmäßig wiederkehrendes Format das Rückgrat des internen Wissensaustauschs. Sie boten eine Plattform für Projektvorstellungen, Präsentationen aktueller Forschungsergebnisse und interaktive Diskussionen. Besonders hervorzuheben ist das Speeddating-Format, bei dem Vertreter unterschiedlicher Verbundprojekte in Gruppenräumen zusammengebracht wurden, um in intensivem Austausch potenzielle Synergien zu identifizieren. Die Ergebnisse wurden auf virtuellen Kollaborationsplattformen dokumentiert und in nachfolgenden Treffen ausgewertet. Das virtuelle Format überbrückte die geografische Distanz zwischen den über Deutschland verteilten Teilnehmern und bot gleichzeitig Flexibilität. Aus theoretischer Perspektive adressierten die Transfertreffen sowohl die Stickiness des Wissens, also dessen schwere Übertragbarkeit, als auch die organisatorische und physische Distanz zwischen den Akteuren (Salmi & Torkkeli, 2009).

Tagungen

Während der Projektlaufzeit wurden Tagungen als offene Plattformen für den Austausch zwischen internen und externen Teilnehmern durchgeführt. Diese umfassten inspirierende Keynote-Vorträge zu aktuellen Entwicklungen der CE, Workshops mit Ergebnispräsentationen aus den Verbundprojekten sowie Networking-Möglichkeiten in informellen Formaten. Externe Teilnehmer wurden ermutigt, ihre eigene Forschung oder Projekte vorzustellen, wodurch interdisziplinäre Kooperationen initiiert wurden. Im Kontinuum der Transfermethoden sind Tagungen im mittleren Bereich einzuordnen: Sie kombinieren kodifizierte Elemente wie Vorträge und Präsentationen mit personalisierten Elementen wie Diskussionsrunden und Networking.

Working Groups

Als nachhaltiges Transferinstrument wurden themenspezifische Working Groups eingeführt. Diese bereichsspezifischen Expertenteams aus den Verbundprojekten wurden durch DIONA initiiert und sollten sich mittelfristig eigenständig und selbsttragend organisieren, auch über die Projektlaufzeit hinaus. Ziel war es, kreative Think Tanks zu etablieren, die innovative Forschungsansätze, Projektideen und Kooperationen innerhalb und außerhalb des MobilKreises hervorbringen. Die Working Groups stellen auf dem Kontinuum der Transfermethoden ein stark personalisiertes Instrument dar, das besonders für den Austausch impliziten Wissens geeignet ist. Sie adressieren zudem die organisatorischen Rahmenbedingungen, die nach Hansen et al. (1999) und Thiel (2002) für die Personalisierungsstrategie essenziell sind.

Workshops und cyberphysisches Labor

Die Workshop-Formate wurden als interaktive Veranstaltungen mit klaren Fokusthemen und praxisnahen Anwendungen geplant. Ziel war die Erarbeitung konkreter Handlungsempfehlungen für die Weiterentwicklung von Prozessen, wobei industrielle Teilnehmer aktiv eingebunden wurden. Ein besonderer Veranstaltungsort war das cyberphysikalische Labor in Chemnitz, das eine technologisch fortschrittliche Umgebung für die interaktiven Sessions bot. Durch den Einbezug des cyberphysischen Demonstrators konnten Fokusthemen nicht nur theoretisch vertieft, sondern auch in konkreten Anwendungen am Beispiel der Brennstoffzellen veranschaulicht werden. Dieses Format weist die höchste Informationsreichtum aller eingesetzten Instrumente auf, da es neben der verbalen Kommunikation auch haptische und visuelle Erfahrungen ermöglichte und damit die Externalisierung impliziten Wissens besonders effektiv unterstützte.

Kommunikationskanäle und Publikationen

Für eine effektive Kommunikation und einen erfolgreichen Ergebnistransfer wurden verschiedene Kommunikationskanäle systematisch genutzt. Die Kommunikationsziele umfassten die Steigerung von Bekanntheit und Reichweite für DIONA und den MobilKreis, die Vernetzung mit neuen Kontakten sowie die Sensibilisierung und Aufklärung zur CE in der Automobilindustrie. Als zentrale Kanäle dienten der MobilKreis Digital Hub, die Projektwebsite und LinkedIn. Im Kontext der Transferstrategien stellen diese Kommunikationskanäle primär kodifizierte Instrumente dar, die über das Push-Prinzip eine breite Streuung von Informationen ermöglichten.

Publikationen nahmen eine herausragende Position im Transferkonzept ein. Wissenschaftliche Publikationen ermöglichten es, Erkenntnisse, Methoden und Schlussfolgerungen einem breiten Fachpublikum zugänglich zu machen. Der Peer-Review-Prozess gewährleistete dabei einen Qualitätsstandard und eine kritische Überprüfung. Ein internes Ziel des Konsortiums war die partnerübergreifende Zusammenarbeit bei gemeinsamen wissenschaftlichen Publikationen. Neben wissenschaftlichen Veröffentlichungen in renommierten Konferenzen und Fachzeitschriften aus den Bereichen Information Systems, Modellbildung und Simulation sowie Maschinenbau wurden gezielt auch praxisnahe und populärwissenschaftliche Publikationsformate bedient, um die Reichweite über die Fachgemeinschaft hinaus zu erweitern. Aus theoretischer Sicht stellen Publikationen ein klassisches Instrument der Kodifizierungsstrategie dar, das primär explizites Wissen vermittelt und auf die Wiederverwendbarkeit einmal generierter Inhalte abzielt (Hansen et al., 1999).

Zusammenfassend verfolgte das DIONA-Transferkonzept einen theoretisch fundierten, mehrdimensionalen Ansatz, der die Erkenntnisse der Wissenstransferforschung konsequent auf die spezifischen Anforderungen des MobilKreis-Verbunds übertrug. Durch die systematische Kombination von Kodifizierungs- und Personalisierungsstrategien, die Berücksichtigung von Push- und Pull-Mechanismen sowie die zielgruppenorientierte Stakeholderansprache wurde ein nachhaltiger Beitrag zur Überführung von Forschungsergebnissen in die Praxis der CE in der Automobilindustrie geleistet.

6.2 Veranstaltungen

Eine der Hauptaufgaben von DIONA bestand darin, Forschungsergebnisse sowohl aus dem eigenen Projekt als auch aus den weiteren MobilKreis-Projekten zu transferieren und den Austausch zwischen diesen Projekten sowie mit weiteren relevanten Stakeholdern zu fördern. Die Ergebnisse wurden über verschiedene Kanäle verbreitet, und es wurden vielfältige Formate zur Vernetzung angeboten, die in diesem Kapitel näher vorgestellt werden.

6.2.1 MobilKreis-Tagungen

In den Jahren 2024 und 2025 fand jeweils eine MobilKreis-Tagung statt. Die Tagungen boten eine Plattform für Erfahrungsaustausch, das Sammeln wertvoller Anregungen, die Entwicklung neuer Ideen und interessante Diskussionen zum Thema CE. Unter Mitwirkung der Verbundprojekte konnte ein breites Programm an Fachvorträgen, Workshops und Keynotes sowie ein Raum für eine gemeinsame Transformation in Richtung Nachhaltigkeit geschaffen werden.

MobilKreis Tagung 2024 - Chemnitz

Am 24. und 25. September fand an der TU Chemnitz die erste MobilKreis-Tagung statt. Die Veranstaltung wurde in enger Zusammenarbeit mit einer Eventagentur realisiert, wobei die Finanzplanung und die Programmerstellung auf Basis eingereichter Abstracts sowie die Kommunikation mit den Vortragenden im Mittelpunkt standen.

Die Veranstaltung brachte ca. 100 Teilnehmer aus teilnehmenden Projekten der vom Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt geförderten Maßnahme MobilKreis zusammen und stand darüber hinaus weiteren Teilnehmern offen. Im Anschluss teilten die Vortragenden die insgesamt 24 Beiträge über den MobilKreis-Hub. Die Schwerpunkte der 22 Tagungsvorträge lagen in den Bereichen: End-of-Life-Strategien; Automatisierte, flexible Demontage und KI-gestützte Systeme; Digitalisierung, Datenmanagement und Datenökosysteme; Entscheidungsunterstützung und nachhaltige Produktentwicklung.



Fotograf: Georgiy Kupenskiy

Parallel zu den Vorträgen wurde an beiden Tagen das cyberphysische Labor in den Räumen der Professur Wirtschaftsinformatik – Geschäftsprozess- und Informationsmanagement (Technische Universität Chemnitz) geöffnet. Die Besucher erhielten neben einer Vorstellung des Demonstrators und des Labor-Konzepts auch die Möglichkeit zur Teilnahme an drei Workshops: CE verstehen - der Basis-Workshop für KMU, Geschäftsprozesse in der CE und Geschäftsmodelle für die CE. Da sich die Workshops und das Labor an KMU richteten, wurden die Tagungsteilnehmer gezielt um Feedback gebeten, um die Angebote für die Zielgruppe sukzessiv zu verbessern.



Fotograf: Georgiy Kupenskiy

Neben den Vorträgen und Keynotes wurden im cyberphysischen Labor des DIONA Projektes Workshops zu den Themen „CE verstehen: Der Basis-Workshop für KMU“, „Geschäftsprozesse in der CE“ sowie „Geschäftsmodelle für die CE“ mit den Teilnehmern der Tagung durchgeführt. Die Workshops werden auch zukünftig in den Räumen der TUC angeboten und sollen KMU befähigen, Teil einer kreislauffähigen Wirtschaft zu werden.

Die Tagung erhielt einen ganzheitlichen Rahmen durch die Reden von Prof. Dr. Barbara Dinter und Prof. Dr.-Ing. habil. Boris Otto sowie den Keynotes von Dipl.-Ing. (FH) Michael Naumann (Bertrand Group) und Univ.-Prof. Dr. Marlen Gabriele Arnold.

Dipl.-Ing. (FH) Michael Naumann, Engineering Dienstleister Bertrand, beschrieb in seinem Vortrag „Circular Economy as a Service“ die Herausforderungen und Chancen von Dienstleistern speziell im Engineering Bereich in Hinblick auf CE in der Automobilindustrie. Am Beispiel einer Hochvoltbatterie zeigte er die durch Bertrand geleitete Etablierung eines Life Cycle Management Ansatz auf. Hierdurch wurde insbesondere die Komplexität von ganzheitlichen Ansätzen und der notwendigen Expertise durch Experten verdeutlicht.

Univ.-Prof. Dr. Marlen Gabriele Arnold, Leiterin der Professur Betriebliche Umweltökonomie und Nachhaltigkeit an der Technischen Universität Chemnitz, sprach über das Verständnis von CE und zukünftige regulatorische Entwicklungen.



Fotograf: Georgiy Kupenskiy

Am Ende des zweiten Tages fand ein weiteres Koordinatorentreffen der MobilKreis-Projekte statt, das den intensiven Austausch zwischen den Projektbeteiligten förderte. Dabei wurden die im Rahmen des ersten MobilKreis-Koordinatorentreffens, das im Vorfeld der Circularity Days 2024 in Wolfsburg stattfand, gewonnenen Erkenntnisse aufgegriffen, reflektiert und weiterentwickelt. Ziel war es, vertieft auf Fokusthemen der damaligen Veranstaltung einzugehen (siehe Koordinatorentreffen Circularity Days), um eine Forschungsroadmap zu erstellen, welche zukünftige Ausschreibungen beeinflusst. Ergänzend sollte dieses Treffen ebenfalls Netzwerkarbeit innerhalb des MobilKreises unterstützen, um gemeinsame Forschungsgruppen zu ermöglichen und somit ein starkes MobilKreis-Netzwerk aufzubauen.

Um die Forschungsroadmap entwickeln zu können, wurde zunächst ein Rückblick auf das vorangegangene Treffen geworfen, die Ergebnisse erneut vorgestellt und ein Workshop zur Weiterentwicklung durchgeführt. In vier Arbeitsstationen wurden die übergeordneten Forschungsthemen diskutiert. Die Teilnehmer konnten neue Impulse und mögliche Perspektivveränderungen teilen. Hierdurch wurden folgende Themengruppen identifiziert werden:

- End-of-Life-Strategien (Funktionalitätsprüfung, generelle Wiederverwendung von Komponenten, Remanufacturing, Geschäftsmodelle)
- Automatisierte, flexible Demontage und KI-gestützte Systeme (Batterien, Motoren, Kunststoff-Metall Verbunde, autonome Demontage, automatisierte Sortierung, KI-Zustandserfassung, Prozessoptimierung)
- Digitalisierung, Datenmanagement und Datenökosysteme (in Batterielogistik, Informationsaustausch in Produktionsnetzwerken, Batteriepass, State-of-Health Daten, CO₂- und Rohstoffpreise, GAIA-X)
- Entscheidungsunterstützung und nachhaltige Produktentwicklung (Richtlinien, ökologische und ökonomische Bewertungen, Lebenszyklusbetrachtung, Entwicklung Fahrzeug-Komponenten, Assistenzsysteme in Produktentstehung)

An den Stationen dienten einige vorab formulierte Fragen als Anregung für die Diskussionen. Die Ergebnisse konnten von den Teilnehmenden auf den Postern gesammelt werden. Nach 15-20 Minuten wurden die Stationen gruppenweise gewechselt, bis jede Gruppe an jeder einzelnen Station diskutiert hatte. Die Ergebnisse wurden im Nachgang durch das Projekt DIONA aufgearbeitet und innerhalb des MobilKreises bereitgestellt.

Zum Abschluss wurden den Teilnehmenden noch Zeit und Raum für weitere vertiefte Gespräche gegeben, um über die Zusammensetzung von Forschungsgruppen, z. B. für Paper, Anträge oder für ein thematisches Kolloquium sprechen zu können.



Fotograf: Georgiy Kupenskiy

Am Koordinatorentreffen der MobilKreis Tagung 2024 nahmen neben den Veranstaltern des Projekts DIONA, auch Vertreter des PTKA und von 10 MobilKreis Projekten teil.

MobilKreis Tagung 2025 - Dortmund

Nach einem erfolgreichen Auftakt fand am 23. und 24. September 2025 an der Technischen Universität Dortmund die zweite und zugleich letzte MobilKreis Tagung unter dem Motto „CE gemeinsam gestalten: Innovationen zwischen Wissenschaft und Praxis“ statt. Die Veranstaltung bot den 110 Gästen ein vielfältiges Programm mit wissenschaftlichen Vorträgen, einer Demonstratorenausstellung, Keynotes aus Wissenschaft und Praxis, Workshops, einer Abendveranstaltung sowie Abschlussvorträgen der MobilKreis Projekte.

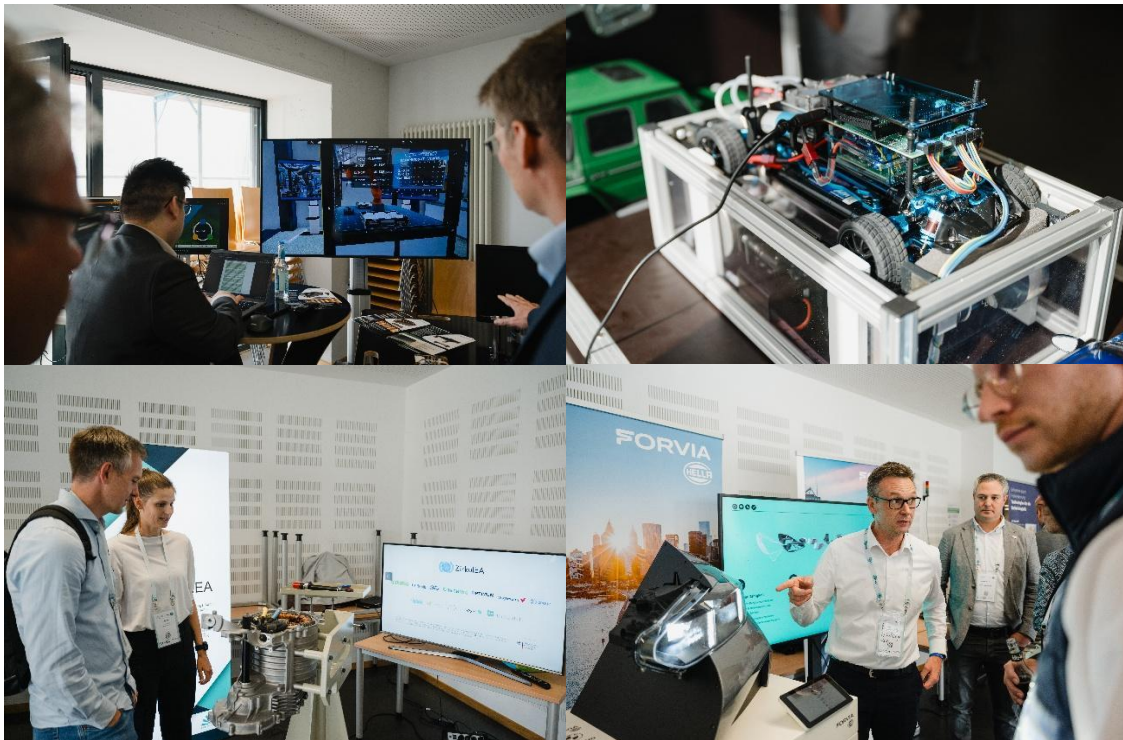
Insgesamt wurden 20 Vorträge zu Shortpapers gehalten, die als Sammelband kostenlos auf dem MobilKreis Hub (<https://hub.mobilkreis.de/?action=overview&courseid=118>) veröffentlicht wurden. Die Beiträge sind bis Ende September 2026 auf dem MobilKreis Hub einsehbar, danach wird der Sammelband auf die Lehrstuhlseite des IIM (<https://iim.mb.tu-dortmund.de/forschung/projekte/diona-1/>) beim Projekt DIONA transferiert. Die Themen reichten vom Daten- und Informationsaustausch für eine CE in der Automobilindustrie über zirkuläres Produktdesign für Scheinwerfer und Equipment-as-a-Service-Modelle bis hin zu automatisierter Demontage und Wiederverwendungsstrategien von Batterien. Das vollständige Programm ist auf der Tagungswebsite <https://mobilkreis.de/mobilkreis-tagung-2/> (Website verfügbar bis Ende September 2026) einsehbar. Alle Beiträge wurden vor ihrer Präsentation auf der Tagung von DIONA begutachtet, um die inhaltliche Qualität und die thematische Passung zum Gesamtkontext der Veranstaltung sicherzustellen.



Fotograf: Ludger Staudinger

Um die Ergebnisse anschaulich zu vermitteln, wurden Demonstratoren der MobilKreis Projekte ausgestellt, darunter ein Trainingsprogramm für Batteriesicherheit des Projekts InnoLogBat, das verschiedene Optionen zur sicheren Lagerung von Batterien zeigte. Das Projekt EKODA präsentierte ein Lenkgetriebe und eine Zahnstange zur Wiederverwertung von Antriebsstrangkomponenten, während ZirkulEA einen Demonstrator zur Demontage von E-Achsen ausstellte. Dieser Demonstrator entstand vor dem Hintergrund der wertvollen Materialien in den E-Achsen, die jedoch in unterschiedlichen Varianten und komplexen Verbindungen wie Sprengringen oder Klebeverbindungen vorkommen können. Beim Aufbau des Demonstrators ging ZirkulEA so vor, dass zunächst eine Produktanalyse durchgeführt wurde, in der ein Demontagegraph mit der Aufteilung der Aufgaben zwischen Mensch und Roboter erstellt wurde. Anschließend wurden die einzelnen Demontageschritte auf ihre Automatisierbarkeit geprüft und bewertet. Danach erfolgte der Ausbau automatisierter Schritte am Clausthaler Umwelttechnik Forschungszentrum, während für die manuellen Schritte eine Demontagestation am wbk Institut für Produktionstechnik aufgebaut wurde. NALYSES stellte einen nachhaltigeren Automobilscheinwerfer aus und CYCLOMETRIC präsentierte ihre Software zur Analyse von Nachhaltigkeitsdaten von Mittelkonsolen.

DIONA präsentierte ihr cyberphysisches Labor, das eine flexible Lehrumgebung für alle Workshops des Projekts bietet und einen Brennstoffzellenstack als gemeinsamen Use Case umfasst. Auf der sogenannten Kreislauf Map werden die R-Strategien der CE veranschaulicht. Zudem ist ein Miniatur Fahrzeugprüfstand mit einer Simulation gekoppelt, die über ein Smartboard präsentiert und bedient werden kann. Mithilfe eines Messekoffers ist der Demonstrator auch mobil in Workshops einsetzbar.



Fotograf: Ludger Staudinger

Die drei Workshops zu den Grundlagen der CE und zur Analyse der Bauteilhaltbarkeit mithilfe von Fahrzeugdaten und Simulation, zu Geschäftsprozessen und digitalen Methoden für nachhaltige Wertschöpfung sowie zur Entwicklung zirkulärer Geschäftsmodelle wurden ebenfalls auf der Tagung angeboten und von den Gästen besucht.



Fotograf: Ludger Staudinger

Durch die Eröffnungsreden von Prof. Dr. Barbara Dinter sowie die Keynotes von Prof. Dr.-Ing. habil. Boris Otto, Univ.-Prof. Dr.-Ing. Thomas von Unwerth und Dipl.-Ing. (FH) Jörg Witthöft wurde die Veranstaltung sowohl wissenschaftlich als auch praxisnah bereichert. Prof. Dr.-Ing. habil. Boris Otto, Lehrstuhlinhaber des IIMs der TU Dortmund und Leiter des Fraunhofer ISST, gab in seiner Präsentation „Data Ecosystems and the Circular Economy“ Einblicke in die Bedeutung der Etablierung von Datenökosystemen für die CE. Er betonte, dass regulatorische Anforderungen eine verstärkte Zusammenarbeit entlang der gesamten Wertschöpfungskette notwendig machen.

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Thomas von Unwerth, Leiter der Professur für Alternative Fahrzeugantriebe an der Technischen Universität Chemnitz, Direktor des Instituts für Automobilforschung und Vorstandsvorsitzender des H2-Technologieclusters Hzwo e. V., erläuterte in seinem Vortrag „Wasserstoff als zukünftiger Energieträger und seine Potenziale für eine nachhaltige CE“ die vielfältigen Vorteile von Wasserstoff, etwa die Möglichkeit einer CO₂-freien Erzeugung.

Dipl.-Ing. (FH) Jörg Witthöft, Standortleiter bei der ZF Group, zeigte in seinem Vortrag „CE gemeinsam gestalten“ auf, dass durch Remanufacturing geschlossene Wertstoffkreisläufe ermöglicht werden. Dabei entstehen Produkte, die auf den neuesten Stand gebracht werden, ihre volle Funktionalität behalten und dieselbe Garantie wie Neuprodukte bieten.



6.2.2 Weitere Veranstaltungen

Neben der Mobilkreistagung wurde der Wissenstransfer durch einige weitere Formate in Industrie und Wissenschaft gefördert. Auf wissenschaftlichen Konferenzen wurde der aktuelle Forschungsstand kontinuierlich überwacht, während bei Industriebesuchen wie z.B. Werksführungen und Vernetzungsveranstaltungen die Anwendbarkeit der Ansätze aus der Forschung kommuniziert und untersucht wurden. Um vorerst den aktuellen Forschungsstand der Mobilkreis-Projekte festzustellen, fand eine Reihe von internen Mobilkreis Transfertreffen im digitalen Format statt.

Das erste Transfertreffen am 29. März 2023 wurde virtuell durchgeführt und diente primär der Vorstellung von DIONA sowie der Identifikation von Synergien zwischen den Projekten. In interaktiven Breakout-Sessions an „digitalen Messeständen“ wurden spezifische Herausforderungen in Themenfeldern wie Datenmanagement, Standardisierung und Produktlebenszyklus-Analyse (LCA) erarbeitet. Die Ergebnisse machten deutlich, dass ein hoher Bedarf an einheitlichen Definitionen und sicheren Plattformen für den projektübergreifenden Datenaustausch besteht.

Beim zweiten Transfertreffen im September 2023 stand erneut die Vertiefung der industriellen und wissenschaftlichen Kontakte im Fokus. In dieser Veranstaltung präsentierten die Projekte InnoLogBat, EKODA und AutoPilot ihren aktuellen Forschungsstand und gaben Einblicke in innovative Ansätze zur CE. Das Format ermöglichte eine direkte Diskussion über die Übertragbarkeit von Lösungsansätzen zwischen den verschiedenen Teilbereichen des Mobilkreises.

Das dritte Transfertreffen fand im Januar 2024 unter dem Leitthema „Auf dem Weg zur nachhaltigen Mobilität durch kreislauffähige Wertschöpfung“ statt. Hierbei präsentierten Vertreter der Projekte DiNaPro, PlasticBond und EcoHub ihre Fortschritte bei der modellbasierten Digitalisierung von Produktionsnetzwerken und der Bewertung von Kunststoff-Werkstoffkreisläufen. Neben der Mobilkreis-Tagung halfen insbesondere die digitalen Transfertreffen, einen Überblick zu gewinnen, und den Kennlernprozess einzuleiten.

Zur Vernetzung innerhalb der sächsischen Wirtschaftslandschaft fand zudem ein engerer Austausch mit dem Innovationscluster Circular Saxony statt, welcher die Kompetenzen der Vereine Circular MTC e. V. und Energy Saxony e. V. bündelt. Neben dem Besuch von Netzwerkveranstaltungen führte das Projektteam einen gezielten Workshop für Vertreter von Circular Saxony durch. Dies unterstützte darin, einerseits einen Überblick über sächsische Unternehmen im Bereich der CE zu erhalten und andererseits Unternehmen im Cluster von DIONA in Kenntnis zu setzen. Ziel dieser Kooperation war es, aktuelle Herausforderungen der Praxis zu verstehen und neue Methoden des Transfers zu entdecken.

Auch wurden deutschlandweit Unternehmen wie das LRP Autorecycling GmbH besucht, um CE-Ansätze in der Praxis zu erleben.

Zum Beispiel fand ein Vor-Ort-Besuch bei der LRP in Krostitz am 2. Mai 2024 statt. Die Teilnehmenden erhielten Einblicke in die Digitalisierungsstrategien des Unternehmens, insbesondere in Bezug auf die automatisierte PKW-Demontage und die Nutzung Digitaler Zwillinge zur effizienteren Lagerhaltung sowie zur Berechnung des CO₂-Fußabdrucks. Dieser Austausch diente der Identifikation konkreter Anforderungen an die softwareseitige Unterstützung von Recyclingprozessen. Es wurde herausgearbeitet, dass insbesondere die Daten- und Technologiekompetenz LRPs einen starken Wettbewerbsvorteil gegenüber anderen Autorecyclinganlagen bietet. Alt- bzw. Ersatzteile konnten besser gelagert, und deren Zustand genauer erfasst werden. Durch die genaue Zustandserfassung konnte LRP die Wiederverwertung der Recyclingobjekte genau bestimmen und den passenden R-Prinzip zuordnen. Der Ansatz von LRP bestätigte die in der Wissenschaft erarbeiteten Kenntnisse, dass eine Verbesserung der Daten- und Technologiekompetenz die Innovation kreislauffähiger Geschäftsmodelle und -prozesse unterstützt.



Forschungsergebnisse zu kreislauffähigem Handeln wurden weltweit auf wissenschaftlichen Konferenzen überprüft und diskutiert.

Vom 13. bis 18. Juni 2025 beteiligte sich das Projektteam an der European Conference on Information Systems (ECIS) in Amman (Jordanien) durch die Teilnahme am Workshop „Technology as an Enabler for Circular Economy (Tech4CE)“ und durch den Austausch in verschiedenen Tracks der Konferenz. Im Rahmen dieses Workshops wurden mit dem Beitrag „A Bottom-Up Approach to Leveraging Digital Technologies for Circular Economy Process Design“ die wissenschaftlichen Ergebnisse aus dem AP 1.2.1 vorgestellt. Der Fokus lag auf der Präsentation einer explorativen Methode zur Entwicklung zirkulärer Geschäftsprozesse, die die Integration digitaler Technologien in den Mittelpunkt stellt, um insbesondere Unternehmen bei der Weiterentwicklung bestehender Strukturen sowie bei der Umsetzung nachhaltiger, kreislauffähiger Innovationen in der Prozessgestaltung zu unterstützen.

Dies stellte bereits die dritte Beteiligung an der Pre-ECIS-Workshopreihe der Special Interest Group (SIG) Green (Green Information Systems – Digital Sustainability) der Association for Information Systems dar. Zuvor waren bereits 2023 Barbara Dinter und 2024 Katharina Langenbach mit Beiträgen vertreten. Die kontinuierliche Präsenz verdeutlicht die aktive Einbindung des Projekts DIONA in die wissenschaftliche Community und unterstreicht dessen Beitrag zur Weiterentwicklung des Diskurses zu digitalen Nachhaltigkeits- und CE-Themen.

Vom 14. bis 16. August 2025 beteiligte sich das Projektteam an der Americas Conference on Information Systems (AMCIS) durch die Organisation des Minitracks „Industrial Data Ecosystems“. Der Fokus lag auf der Untersuchung von datengetriebenen Artefakten wie Digitalen Zwillingen und Distributed-Ledger-Technologien, um deren Potenzial für die Wettbewerbsfähigkeit und Nachhaltigkeit in der CE zu explorieren. Die im Rahmen dieses Tracks präsentierten wissenschaftlichen Beiträge wurden in der AIS Electronic Library veröffentlicht und leisten einen Beitrag zur Architektur moderner Datenökosysteme sowie zur Digitalisierung industrieller Wertschöpfungsketten in der CE.

Auch in Deutschland im Rahmen der 20. Internationalen Tagung Wirtschaftsinformatik wurde am 14. September 2025 der Workshop Digital Innovations in the CE: Shaping a Circular Future in Münster durchgeführt. Der Workshop richtete sich an Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler, die sich mit digitalen Technologien und deren Potenzial für die CE beschäftigen. Insgesamt gingen sieben wissenschaftliche Beiträge ein, die im Anschluss an den Workshop in den ergänzenden Konferenz-Proceedings veröffentlicht wurden. 48 Personen meldeten sich für den Workshop an, wovon 32 Teilnehmende tatsächlich an den Vorträgen und Diskussionen teilnahmen.

Die Planung des Workshops erfolgte gemeinschaftlich durch Organisatoren der TU Chemnitz, der TU Dortmund und des Fraunhofer ISST und orientierte sich an der Zielsetzung, eine interdisziplinäre Austauschplattform zu schaffen. Die Durchführung umfasste Fachpräsentationen, moderierte Diskussionen, gezielte Feedbackrunden sowie die gemeinsame Entwicklung von thematischen Postern, die den Teilnehmenden ermöglichten, ihre Forschungsansätze kritisch zu reflektieren und weiterzuentwickeln. Inhaltlich deckten die Beiträge ein breites Spektrum ab – von digitalen Plattformen in der CE über Entscheidungsunterstützung in Produktion und Logistik, digital unterstützte Transformationsprozesse und Digitale Zwillinge als Schlüsseltechnologie bis hin zu nachhaltigkeitsorientierten Informationssystemarchitekturen.

Die Auswertung des Workshops zeigte, dass insbesondere die Verbindung zwischen digitalen Technologien, Maschinenbau und zirkulären Strategien weiter vertieft werden muss. Erste Lösungsansätze sowie offene Forschungsfragen wurden in den entwickelten Postern dokumentiert und dienen als Grundlage für zukünftige gemeinsame Arbeiten.



Zusammenfassend, wurde der Wissenstransfer der Mobilkreis-Projekte durch eine enge Verzahnung von Forschung und Praxis realisiert. In drei digitalen Transfertreffen zwischen 2023 und 2024 wurden Synergien zwischen Projekten wie DIONA identifiziert und Bedarfe für sichere Datenaustausch-Plattformen sowie einheitliche Standards definiert. Die industrielle Anwendbarkeit wurde zudem durch die Kooperation mit dem Cluster *Circular Saxony* und Praxisbesuche, etwa beim LRP Autorecycling, validiert. Dort bestätigte sich, dass Digitale Zwillinge und hohe Datenkompetenz die Effizienz zirkulärer Geschäftsmodelle massiv steigern.

Wissenschaftlich wurden die Ergebnisse auf Fachkonferenzen wie der AMCIS 2025 und der WI 2025 international diskutiert. Die Beiträge zu industriellen Datenökosystemen und digitalen Innovationen unterstrichen dabei die Notwendigkeit, Maschinenbau und Informationstechnik interdisziplinär zu verknüpfen, um die Transformation zur nachhaltigen CE erfolgreich zu gestalten.

6.3 Veröffentlichungen

Im Projekt DIONA wurden zahlreiche wissenschaftliche Paper, Whitepaper und Journalbeiträge über die vorher dargestellten Ergebnisse veröffentlicht. Zusätzlich fand reger Austausch über die Ergebnisse in Workshops statt, die teilweise auch von DIONA selbst veranstaltet wurden. Tabelle 24 listet diese Veröffentlichungen und Workshops.

Tabelle 24: Veröffentlichungen aus DIONA.

Institution	Autoren	Titel	Jahr	Konferenz / Journal	Konferenzort
TU Dortmund / TU Chemnitz	Hannah Scheerer, Robert Schmelzer	The Smart Circular Canvas: Connecting Data-Driven Intelligence with Circular Value Creation	2026	HICSS 2026	Maui, USA
TU Dortmund	Schrage, T., Dinter, B.	A Taxonomy for Redesigning After-Sales with the Digital Twin from an Explorative Business Process Management Perspective	2026	EMCIS 2025	Paphos, Zypern

Institution	Autoren	Titel	Jahr	Konferenz / Journal	Konferenzort
TU Dortmund	Schmelzer, R.; Schrage, T.; Rose, D.; van der Valk, H.; Langenbach, K.; Dinter, B.	Data Readiness: Hunting the Data – A Framework for Data-Intensive A	2026	Information Systems 22nd European, Mediterranean, and Middle Eastern Conference	Paphos, Zypern
TU Dortmund	Marlon Philipp, Johannes Weyer	Nachhaltige Transformation der Automobilindustrie? Eine Analyse kreislaufwirtschaftlicher Strategien etablierter Unternehmen	2026	Solving Conflicts on the Way to Sustainable Mobility: Technische und betriebswirtschaftliche Aspekte. Springer Gabler	Wissenschaftsforum Mobilität
TU Dortmund	Philipp, M.; Weyer, J.	Mobilitätssysteme in Transformation: Eine sozialwissenschaftliche Analyse ihrer Produktion und Nutzung im Kontext der Nachhaltigkeit	2026	SDG 12: Nachhaltiger Konsum und nachhaltige Produktion (Band 12 der Reihe "Globale Ziele für nachhaltige Entwicklung")	-
TU Dortmund	Johannes Weyer, Marlon Philipp	Mobilitätssysteme in Transformation Eine sozialwissenschaftliche Analyse ihrer Produktion und Nutzung im Kontext der Nachhaltigkeit	2026	Elisabeth Hackspiel-Mikosch, Christa Liedtke, Thekla Wilkening (Hg.): SDG 12: Nachhaltiger Konsum und nachhaltige Produktion (Band 12 der Reihe "Globale Ziele für nachhaltige Entwicklung"), Springer Nature	-
TU Dortmund	Antonio Isopp	Mehrebenen-Analyse der nachhaltigen und kreislaufwirtschaftlichen Transformation der deutschen Automobilindustrie – Ein Forschungsansatz zur Quantifizierung qualitativer Daten	2026	Dissertation	-
TU Chemnitz	Robert Schmelzer, Barbara Dinter	Bridging Technology and Business: A Digital Twin Taxonomy for Value Creation	2025	Thirty-first Americas Conference on Information Systems	Montreal, Kanada
TU Dortmund	Julia Kunert, Alexander Wuttke, Hendrik van der Valk	Review of Digital Technologies for the Circular Economy and the Role of Simulation	2025	Winter Simulation Conference	Seattle, USA
TU Dortmund	Katharina Langenbach, Markus Rabe, Christin Schumacher	DECISION SUPPORT SYSTEMS IN PRODUCTION LOGISTICS: AN ANALYTICAL LITERATURE REVIEW	2025	2025 Winter Simulation Conference	Seattle, USA
TU Chemnitz	Schrage, T.; Schmelzer, R.	A Bottom-Up Approach to Leveraging Digital Technologies for Circular Economy Process Design	2025	European Conference on Information Systems 2025	Amman, Jordan
TU Dortmund / TU Chemnitz / Fraunhofer ISST	Hendrik van der Valk, Tennessee Schrage, Robert Schmelzer, Christoph Hoppe-Ludwig	Workshop 3 - Digital Innovations in the Circular Economy: Shaping a Circular Future	2025	Wirtschaftsinformatik 2025	Münster, Deutschland

Institution	Autoren	Titel	Jahr	Konferenz / Journal	Konferenzort
TU Chemnitz	Daniel Rose	Green Business Process Management: BPMN-based Simulation to Support Circular Business Processes Workshop:	2025	Wirtschaftsinformatik 2025	Münster, Deutschland
TU Dortmund	van der Valk, H.; Schrage, T.; Schmelzer, R.; Hoppe-Ludwig, C.	Workshop 3 -Digital Innovations in the Circular Economy: Shaping a Circular Future	2025	Wirtschaftsinformatik 2025	Münster, Deutschland
TU Chemnitz	Tennessee Schrage	Evaluating the Implementation of Explorative Process Design Patterns Enabled by the Digital Twin – A Task-Technology Fit Perspective	2025	Australasian Conference on Information Systems	Australia
TU Dortmund	Hendrik van der Valk	Analyzing Implementation for Digital Twins: Implications for a Process Model	2025	Wirtschaftsinformatik 2025	Münster, Deutschland
TU Dortmund	Julia Kunert	Towards Requirements for Digital Technologies in the Circular Economy	2025	Wirtschaftsinformatik 2025	Münster, Deutschland
TU Dortmund	Hannah Scheerer	Enabling Traditional Industrial Organizations to Implement Circular Strategies: Capabilities and Resources		Wirtschaftsinformatik 2025	Münster, Deutschland
TU Dortmund	Katharina Langenbach	Conception of a process for data transformation and the selection of decision support methods in production and logistics	2025	Wirtschaftsinformatik 2025	Münster, Deutschland
TU Dortmund	Katharina Langenbach, Florian Hochkamp, Markus Rabe	Studie zur Nutzung von Entscheidungsunterstützungssystemen in der Produktionslogistik	2025	ASIM Fachtagung SPL 2025	Dresden, Deutschland
TU Dortmund	Antonio Isopp, Marlon Philipp, Johannes Weyer, Aaron Zilt	Sustainable Transition in the automotive industry: Investigating incumbent companies and their circularity efforts	2025	IST 2025/ <i>Cleaner logistics and supply chain</i>	Oslo, Norwegen
Fraunhofer ISST / TU Dortmund	Christoph Hoppe-Ludwig, Thorsten Schoormann, Stephanie Winkelmann, Frederik Möller	Tensions in implementing a circular economy – Empirical insights from the automotive industry	2025	Computers & Industrial Engineering 204(3–4)	-
Fraunhofer ISST	Christoph Hoppe-Ludwig, Thorsten Schoormann, Frederik Möller	A capability map for implementing the circular economy in organizations	2025	Journal of Industrial Ecology 29(6):2282-2293	-

Institution	Autoren	Titel	Jahr	Konferenz / Journal	Konferenzort
Fraunhofer ISST	Chrisoph Hoppe-Ludwig, Ilka Jussen-Langenbach	From Reports to Action: Leveraging Generative AI for Automated Document Analysis and Circular Economy Recommendation Generation	2025	31st Americas Conference on Information Systems (AMCIS)	Montréal, Kanada
Tu Dortmund	Stephanie Winkelmann, Rajae Guennoun, Frederick Möller, Thorsten Schoormann, Hendrik van der Valk	Back to a resilient future: Digital technologies for a sustainable supply chain	2024	Information Systems and e-Business Management	-
Tu Dortmund	Rajae Guennoun, Stephanie Winkelmann, Frederik Möller	Data for Sustainable Development in Logistics and Supply Chains – A Systematic Literature Review	2024	Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS)	Honolulu, Hawaii, USA
Tu Dortmund	Hendrik van der Valk, Robert Schmelzer, Daniel Rose, Barbara Dinter	Towards a Process Model for Digital Twin Implementation: The Implementation Canvas	2024	CIRP Conference on Life Cycle Engineering	Turin, Italien
Tu Dortmund	Hendrik van der Valk, Estelle Duparc, Nick Große, Tan Gürpınar	Introduction to the Minitrack on Federated Industrial Platform Ecosystems: Technologies, Business Models, and Data-Driven Artifacts	2024	Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS)	Honolulu, Hawaii, USA
TU Dortmund / Fraunhofer ISST	Julia Kunert, Hendrik van der Valk, Hannah Scheerer, Christoph Hoppe	POTENTIALS AND BARRIERS OF THE METAVERSE FOR CIRCULAR ECONOMY	2024	2024 Winter Simulation Conference	Orlando, Florida
TU Dortmund	Hendrik van der Valk, Julia Kunert, Niklas Harke, Katharina Langenbach	INDUSTRIAL METAVERSE IN SUPPLY CHAIN MANAGEMENT: APPLICATIONS, CONCEPTS, AND OPEN RESEARCH PATHS	2024	2024 Winter Simulation Conference	Orlando, Florida
TU Chemnitz / Fraunhofer ISST / TU Dortmund	Lisa Remke, Marlon Philipp, Christoph Hoppe, Benjamin Koch	From Lab to Loop - Designing Sustainable Pathways Towards a Circular Economy in the Automotive Industry - A Digital Hub	2024	Circularity Days	Braunschweig, Deutschland
Fraunhofer ISST / TU Dortmund	Christoph Hoppe, Stephanie Winkelmann, Dimitri Petrik, Thorsten Schoormann,	Data Tensions in the Circular Economy: Empirical Insights from the Automotive Industry	2024	Wirtschaftsinformatik 2024	Würzburg, Deutschland

Institution	Autoren	Titel	Jahr	Konferenz / Journal	Konferenzort
	Frederik Möller				
Fraunhofer ISST / TU Dortmund	Christoph Hoppe, Stephanie Winkelmann, Thorsten Schoormann, Frederik Möller	GET READY FOR THE FUTURE: CAPABILITIES FOR A CIRCULAR ECONOMY IN THE AUTOMOTIVE INDUSTRY	2024	European Conference on Information Systems 2024	Paphos, Zypern
TU Dortmund	Antonio Isopp, Marlon Philipp, Prof. Dr. Johannes Weyer, Aaron Zilt	Exploring differing perspectives on sustainability and corresponding strategies in German automotive companies	2024	International Journal of Automation Technology	-
TU Dortmund	Antonio Isopp, Marlon Philipp, Prof. Dr. Johannes Weyer, Aaron Zilt	Sustainable Transition in the automotive industry: Investigating incumbent companies and their circularity efforts	2024	International Sustainability Transitions (IST) Conference 2024	Oslo, Norwegen
TU Chemnitz	Tennessee Schrage	Exploring Modifications of the Business Process Management lifecycle	2024	Innovation & Value Creation in Erfurt 2024	Erfurt, Deutschland
TU Chemnitz	Lisa Remke	A Taxonomy of Digital Hubs	2024	Innovation & Value Creation in Erfurt 2024	Erfurt, Deutschland
TU Chemnitz	Robert Schmelzer	Unveiling the Dynamics: Using digital product passports to overcome the challenges of sharing sustainability data in supply chains	2024	Innovation & Value Creation in Erfurt 2024	Erfurt, Deutschland
TU Dortmund	Hendrik van der Valk, Katharina Langenbach	A Digital Hub for the Data Driven Circular Economy	2024	32nd European Conference on Information Systems (ECIS)	Paphos, Zypern
TU Dortmund	Katharina Langenbach, Univ.-Prof. Dr.-Ing. Markus Rabe	Konzeption eines Vorgehensmodells zur Auswahl von Entscheidungsunterstützungsmethoden in der Produktion und Logistik	2024	27. Symposium Simulationstechnik - ASIM 2024	München, Deutschland
TU Dortmund / Fraunhofer ISST	Estelle Duparc, Hendrik van der Valk, Tobias Guggenberger, Anna Schleimer	Governance Mechanisms, and Architectures of Data Ecosystems: Value Creation from Data Products	2024	Americas Conference on Information Systems 2024	Salt Lake City, Utah

Institution	Autoren	Titel	Jahr	Konferenz/ Journal	Konferenzort
TU Chemnitz	Robert Schmelzer, Daniel Rose, Barbara Dinter	TOWARDS A TAXONOMY FOR DIGITAL TWINS: PAVING THE WAY FOR A CIRCULAR ECONOMY	2024	32nd European Conference on Information Systems (ECIS)	Paphos, Zypern
TU Chemnitz	Lisa Remke, Barbara Dinter	SUSTAINABILITY VS CIRCULAR ECONOMY – LOOKING INTO THE CRYSTAL BALL	2024	32nd European Conference on Information Systems (ECIS)	Paphos, Zypern
TU Chemnitz	Schrage, T.	Exploring Modifications of the Business Process Management lifecycle	2024	Innovation & Value Creation	Erfurt
TU Chemnitz	Eger, B.-L.; Rose, D.; Dinter, B	Einfluss des AI-Acts auf das Gesundheitswesen	2024	Wirtschaftsinformatik 2024	Würzburg
TU Dortmund	Antonio Isopp, Marlon Philipp, Johannes Weyer, Aaron Zilt	Sustainable Transition in the automotive industry: Investigating incumbent companies and their circularity efforts	2024	<i>IST 2025/ Cleaner logistics and supply chain</i>	Oslo, Norwegen
TU Dortmund	Katharina Langenbach, Markus Rabe	Approach for Classifying the Automatability of Verification and Validation Techniques	2023	Winter Simulation Conference 2023	San Antonio, USA
TU Dortmund	Hendrik van der Valk, Thorsten Schoormann, Steūhanie Winkelmann	Sustainable Data Spaces: Digital Ecosystems, Smart Services, and Business Models	2023	International Conference on Exploring Service Science 2023	Genf, Schweiz
TU Dortmund / Fraunhofer ISST	Estelle Duparc, Hendrik van der Valk, Anna Schleimer	Minitrack on Shared Data Ecosystems	2023	Americas Conference on Information Systems 2023	Panama City
TU Dortmund	Hendrik van der Valk, Estelle Duparc, Michael Schmidt, Carina Culotta	Minitrack on Platform Ecosystems in Production and Logistics: Technologies, Business Models, and Data-Driven Artifacts	2023	Hawaii International Conference on System Sciences 2023	Mauui, Hawaii, USA
TU Dortmund	Stephanie Winkelmann, Julia Schweihof, Ilka Jussen, Frederik Möller	Turning Old into New – The Lange Change to a Circular Economy in the Automotive Industry	2023	INFORMATIK 2023	Berlin

Institution	Autoren	Titel	Jahr	Konferenz / Journal	Konferenzort
TU Chemnitz	Schrage, T.	Use Cases in Circular Economy: A Systematization	2023	Innovation & Value Creation	Mailand
Fraunhofer ISST / TU Chemnitz	Christoph Hoppe, Robert Schmelzer, Thorsten Schoorman, Frederik Möller	Data Spaces as Enablers for Sustainability	2023	Informatik Festival 2023	Berlin
Fraunhofer ISST / TU Chemnitz	Christoph Hoppe, Robert Schmelzer, Frederik Möller, Thorsten Schoorman	Data Spaces as Enablers for Sustainability	2023	Informatik Festival 2023	Berlin
TU Chemnitz	Schmelzer, R.	Business process management in circular economies: an overview of requirements	2023	Innovation & Value Creation	Mailand

6.4 MobilKreis Hub

Um gemeinsam von den Fortschritten aus Wissenschaft und Wirtschaft im Bereich nachhaltiger Wertschöpfungsströme zu profitieren und die interdisziplinäre Zusammenarbeit zu fördern, wurde der MobilKreis Hub entwickelt. Er bietet relevante Informationen zu CE und Nachhaltigkeit und schafft Raum für offenen Austausch. Die folgenden Unterkapitel erläutern den Weg des Hubs von der Planung über die Umsetzung und Inhalte bis hin zur Auswertung und den gewonnenen Erkenntnissen. Der Hub kann auch über das Projektende von DIONA hinaus über den Link <https://hub.mobilkreis.de/> erreicht werden und ist kostenfrei.

6.4.1 Planung des Hubs

Um den Verbundpartnern eine effiziente und nachhaltige digitale Zusammenarbeit zu ermöglichen, wird in diesem AP der MobilKreis-Digital-Hub auf Basis des in AP 2.2 entwickelten Rahmenwerks konkret instanziiert und technisch umgesetzt. Ziel ist es, eine zentrale digitale Plattform zu schaffen, die den Austausch von Daten, Wissen und Ergebnissen innerhalb des Verbundes strukturiert und sicher ermöglicht. Das Fraunhofer ISST hat im Rahmen von AP 2.3 in der Laufzeit von Oktober 2023 bis Mai 2024 das in AP 2.2 entwickelte Rahmenwerk gemeinsam mit dem IIM und einem Praxispartner erfolgreich in die Anwendung überführt. Die Aufgaben umfassten insbesondere die Überführung in die Verfestigung, die Koordination der technischen Inbetriebnahme sowie die Konzeption und Durchführung von Schulungs- und Einführungsworkshops. Als methodische Grundlage dienen bewährte Softwareentwicklungs- und Projektmanagementmethoden, die ein systematisches und nachvollziehbares Vorgehen sicherstellen. In einem ersten Schritt ist eine Analyse über bestehende Digital-Hub-Projekte in Deutschland angefertigt worden, um einen Überblick über ähnliche Vorhaben zu erhalten. Aufbauend auf dieser Wissensbasis wurde ein Anforderungskatalog für den zu entwickelnden MobilKreis-Digital-Hubs angefertigt, welcher die grundsätzlichen Funktionen und Anforderungen abbildet.

Zur Konkretisierung des Anforderungskatalogs wurde eine qualitative Interviewstudie mit zehn Expert:innen aus unterschiedlichen Bereichen der Automobilindustrie, Unternehmensberatungen sowie einem automobilindustriebezogenen Digital-Hub durchgeführt. Die Interviews wurden videobasiert geführt, aufgezeichnet, transkribiert und anschließend mithilfe der inhaltlich strukturierenden qualitativen Inhaltsanalyse ausgewertet. Das Vorgehen kombinierte deduktiv aus den Projektzielen und Leitfragen abgeleitete Kategorien mit induktiv aus dem Interviewmaterial

entwickelten Subkategorien. Im Mittelpunkt der Analyse standen das Verständnis eines Digital-Hubs, Herausforderungen bei dessen Nutzung sowie die von den Interviewpartner:innen gewünschten Funktionen.

Die Ergebnisse zeigen, dass der MobilKreis-Digital-Hub zunächst über ein klar kommuniziertes, verständliches Leistungsangebot verfügen sollte, da das Konzept eines Digital-Hubs nicht bei allen relevanten Akteur:innen gleichermaßen bekannt ist. Für die Etablierung des Hubs empfiehlt sich ein schrittweiser Aufbau mit wenigen, aber praxistauglichen Kernfunktionen, die für die beteiligten Unternehmen einen unmittelbaren Mehrwert schaffen.

Eine zentrale Anforderung besteht in der strukturierten Bereitstellung relevanter Informationen zur Kreislaufwirtschaft, beispielsweise zu Fördermöglichkeiten, laufenden Projekten, wissenschaftlichen Erkenntnissen, Technologien, Rezyklaten und potenziellen Kooperationspartner:innen. Diese Informationen sollten über übersichtliche Such-, Filter- und gegebenenfalls KI-gestützte Unterstützungsfunktionen zugänglich gemacht werden. Besonders relevant ist dabei die Aufbereitung in Form konkreter Anwendungsbeispiele, Use-Cases, Success-Stories und leicht umsetzbarer Handlungsempfehlungen, damit insbesondere KMU den praktischen Nutzen erkennen können.

Darüber hinaus soll der Hub eine Vernetzungsfunktion übernehmen und den Austausch zwischen Unternehmen, Forschungseinrichtungen, Verbänden und weiteren Akteur:innen fördern. Dafür sind sowohl digitale Austauschmöglichkeiten als auch Präsenz- und Hybridformate wie Konferenzen, Workshops, regionale Treffen und informelle Netzwerkveranstaltungen vorzusehen. Niedrigschwellige und regionale Angebote sind insbesondere für KMU relevant, da diese häufig nur begrenzte personelle und zeitliche Ressourcen für zusätzliche Veranstaltungen aufbringen können.

Eine weitere Anforderung ist die Unterstützung bei der Identifikation von Geschäfts- und Projektmöglichkeiten im Bereich der Kreislaufwirtschaft. Denkbar ist hierfür eine Datenbank oder Kompetenzlandkarte, in der Organisationen, Expertisen, Forschungsprojekte und Interessensfelder erfasst werden, um passende Kooperationspartner:innen sichtbar zu machen und gezielt zusammenzuführen.

Für die Akzeptanz und aktive Nutzung des MobilKreis-Digital-Hubs sind außerdem ein vertrauenswürdiger Umgang mit Daten, eine angemessene technische Absicherung sowie transparente Datenschutzregelungen erforderlich. Da gerade KMU den zusätzlichen Aufwand und den wirtschaftlichen Nutzen einer Teilnahme sorgfältig abwägen, sollte der Hub seine Angebote aktiv kommunizieren, an bestehende Netzwerke anknüpfen und den konkreten Nutzen für die betriebliche Praxis deutlich herausstellen. Insgesamt bildet der Anforderungskatalog damit die Grundlage für die nutzerorientierte und schrittweise Weiterentwicklung des MobilKreis-Digital-Hubs in Richtung eines nachhaltigen Regelbetriebs. Dieser Anforderungskatalog dient zugleich als Leistungsbeschreibung, auf deren Basis der Hub anschließend im Rahmen eines Unterauftrags verstetigt und in den Regelbetrieb überführt wurde.

Nach erfolgreicher Instanziierung und Inbetriebnahme erfolgte die Einbindung und Schulung der Teilnehmenden. Hierzu sind mehrere Workshops in Kooperation mit dem Auftragnehmer organisiert und durchgeführt worden. In den Workshops konnten sich die Teilnehmenden mit den technischen und organisatorischen Grundlagen des Digital-Hubs vertraut machen. Sie lernten beispielsweise, wie sie eigenständig Kurse anlegen, Nutzer verwalten und auf gemeinsame Ressourcen zugreifen können. Auch nach Abschluss des Workshops wird eine laufende Unterstützung und Betreuung durch das Projektteam angeboten, sodass Fragen, technische Probleme oder Erweiterungsbedarfe zeitnah adressiert werden konnten.

6.5 Inhalte des Hubs

6.5.1 Rahmenwerk für den Mobilkreis-Hub

Für den Aufbau des Mobilkreis-Hubs wurde zunächst ein Rahmenwerk erstellt. Dieses beschreibt die relevanten Stakeholder, die Plattform- und Ökosystemarchitektur, die geplante interdisziplinäre Kollaboration sowie Richtlinien zur Sicherstellung der Replizierbarkeit der Forschungsartefakte. Sowohl interne als auch externe Stakeholder wurden identifiziert und ihre Rollen festgelegt. Die internen Stakeholder beschränkten sich dabei auf die Mobilkreis-Projekte. Jedes Projekt wurde

analysiert, nach den beteiligten Institutionen unterteilt und die jeweiligen Ziele wurden erfasst. Die folgende Tabelle 25 zeigt als Beispiel die Beschreibung des Projekts „DiNaPro“:

Tabelle 25: Übersicht zum Mobilkreis-Projekt DiNaPro

Projekt	Ziel	Konsortialpartner
DiNaPro	- Steigerung der Nachhaltigkeit im Produktentstehungsprozess durch Digitalisierung - Entwicklung eines einheitlichen Datenmodells und Datenaustauschformats - Entwicklung von Assistenzsystemen für ein Nachhaltigkeitsmonitoring und -management“	- TU Darmstadt – Product Life Cycle Management - TU Darmstadt Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen - Heidelberger Druckmaschinen AG - DSC Software AG - Etalytics GmbH - GFT Technologies SE - MUNSCH Chemie-Pumpen GmbH - Opel Automobile GmbH

Die Erfassung der Ziele diente dazu, das Verhältnis der Projekte untereinander zu analysieren und zu verstehen, wie eine Kollaboration den größten Mehrwert stiften kann. Vor diesem Hintergrund wurden mehrere digitale Transfertreffen veranstaltet und die Beschreibungen der einzelnen MobilKreis-Projekte auf dem Hub unter dem Reiter ‚Projekte‘ veröffentlicht. Zudem wurde ermittelt, wie hoch der Anteil der jeweiligen Projekte am MobilKreis-Konsortium war. Insgesamt umfasst das Konsortium 109 Partner, wobei die Anteile der einzelnen Projekte zwischen 5 % und 11 % liegen.

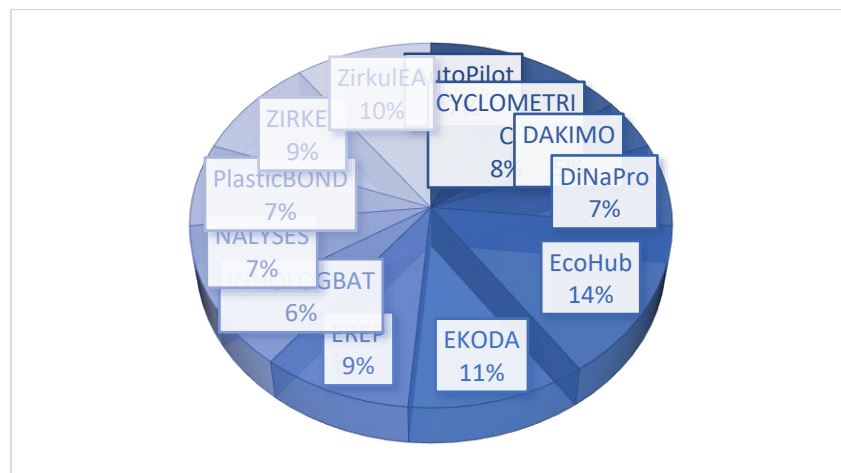


Abbildung 54: Anteil der Mobilkreisprojekte am Gesamtkonsortium

Das Konsortium war interdisziplinär besetzt und vereint Experten aus dem Maschinenbau, der (Wirtschafts-)Informatik, der Logistik, dem Supply Chain Management und den Wirtschaftswissenschaften. Im Vordergrund standen Synergieeffekte zwischen den Projekten. Die Anwendbarkeit von Lösungsansätzen aus einem Bereich sollte für die Herausforderungen anderer Bereiche überprüft werden. In den digitalen Transfertreffen wurde daher nicht nur an den Forschungsschwerpunkten gearbeitet, sondern auch an den gemeinsamen Schwierigkeiten. Die Analyse der Whiteboards aus den Break-out-Sessions ergab, dass die meisten Projekte mit sich überschneidenden Kernproblemen konfrontiert sind. Diese beinhalten die Materialtrennung, fehlende einheitliche Kennzahlen und Bewertungsmethoden sowie mangelnden Datenaustausch und Koordination. Die folgende Abbildung 55 (erstellt auf Basis der Whiteboards) zeigt, wie diese Problematiken miteinander verschachtelt sind.

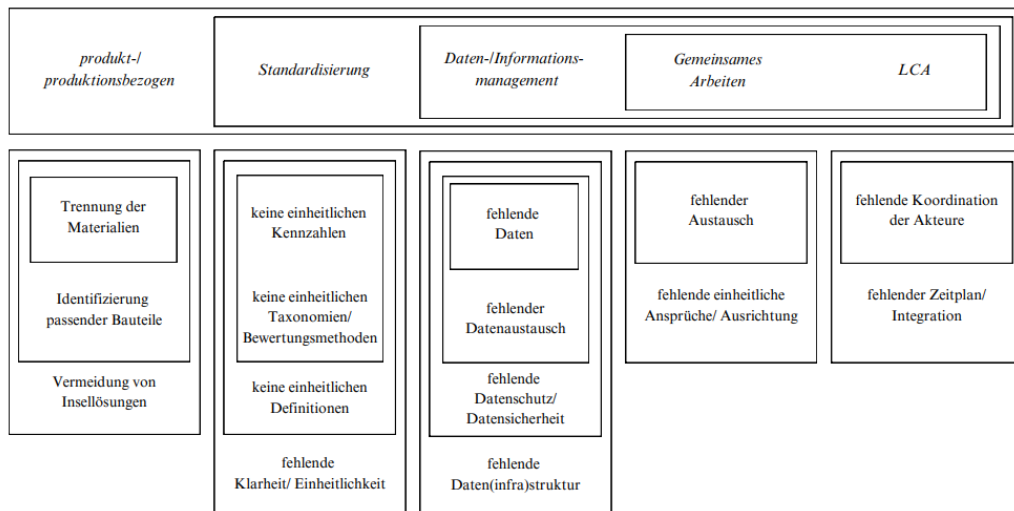


Abbildung 55: Kernproblematiken der MobilKreis-Projekte in der Forschung

Neben den internen Stakeholdern wurden auch externe Stakeholder identifiziert und kategorisiert. Hierzu wurde eine Systematik festgelegt, nach der die Stakeholder eingeordnet werden konnten. Die Grundgruppierung bestand aus den Kategorien „Industrie und Dienstleistungen“ sowie „Forschung und Bildung“. Die Gruppe „Industrie und Dienstleistungen“ unterteilte sich weiter in die Untergruppen „Automobil- und Maschinenbau“, „Technologieunternehmen und Softwareentwicklung“, „Logistik und Dienstleistungen“, „Chemie und Materialwissenschaft“ sowie „Weitere“. Die Bereiche „Universitäten und Hochschulen“ sowie „Forschungsinstitute“ wurden der Gruppe „Forschung und Bildung“ zugeordnet.

Anschließend wurden regionale Unternehmensverzeichnisse durchsucht sowie Netzwerk- und CE-Bildungsangebote für die Industrie (beispielsweise von *Circular Saxony*) analysiert, um relevante externe Stakeholder zu identifizieren und den Gruppen zuzuordnen. Zu jedem der 33 identifizierten Stakeholder wurde eine Kurzbeschreibung angelegt und deren standortbezogener Wirkungsgrad (regional, national oder international) festgelegt. Über den Verlauf von DIONA und auch nach der Erstellung des MobilKreis-Hubs wurden kontinuierlich weitere Stakeholder gesucht und gruppiert.

Zusätzlich zu den Stakeholdern und den Kernproblematiken, die durch den MobilKreis-Hub adressiert werden sollten, wurde eine Anforderungs-Map für den Hub erstellt. Hierzu wurden einerseits europäische Innovation-Hubs und deren Konzeption überprüft und andererseits Interviews mit den MobilKreis-Teilnehmern geführt. Siebzehn deutsche European Digital Innovation Hubs (EDIH) sowie die Plattformökosysteme der „Silicon Economy“, „Federated Platforms“, „Gaia-X“ und „Catena-X“ wurden hierbei herangezogen. Von den 21 untersuchten Objekten wiesen 15 eine zugängliche Webpräsenz auf, welche als Grundlage für die Entwicklung einer Taxonomie diente (siehe Abbildung 56). Im Rahmen dieser Analyse wurden die Metadimensionen Webseitendesign, Kommunikation und Leistung identifiziert. Es zeigte sich, dass die meisten Dimensionen durch eine Mehrfachauswahl an Elementen charakterisiert sind (z. B. Ziele, Maßnahmen, Preis), während lediglich bei Kategorien wie Sprache oder interner Kommunikation eine exklusive Zuordnung möglich war.

Metadimension	Dimension	Elemente															
Webseitendesign	Unterwebseite	Startseite	Themenfelder / Projekte	Mission / Vision / Ziele	Veranstaltungen	Aktuelle / Neugkeiten	Allgemeine Informationen	Kontakt / Übers	Leistungen / Services	Partner Konsortium	Ökosystem / Netzwerk	Blog	Datenschutz	Impressum	Praxisbeispiele der Projekte	Für spezifische Interessen	FAQ
	Sprache	Einsprachig (deutsch oder englisch)								Mehrsprachig (deutsch & englisch)							
Kommunikation	Form	Aktiv				Passiv				Schriftform				Audio-Visuell			
	Intern	Teams					Git-Repository					Login auf Website					
	Extern	Webseite			Organisation von Veranstaltungen			Newsletter			Soziale Medien			Teilnahme an Veranstaltungen (z.B. Messen)			
Leistung	Ziel(e)	KMU-Support		Konzern-Support		Startup-Support		Support öffentliche Verwaltung		Support Geschäftsmodellentwicklung		Wissenstransfer		Technologietransfer		Vernetzung	

	Preis	Kostenfrei						Kostenpflichtig				
	Maßnahmen	Prototyping / Demonstrationen	Labor	Fördermittelberatung	Support Investorensuche	Bereitstellung Co-Working Spaces	Kongress halten	Informationsveranstaltungen	Workshops / Kurse	Studien	Programmieraustausch / Dokumentation	Glossar

Abbildung 56: Taxonomie zu Innovations-Hubs

Die Interviews dienten der systematischen Erfassung der allgemeinen Anforderungen an den Hub. Diese Anforderungen umfassten die Aspekte Benutzerfreundlichkeit, Zugriffssteuerung und Sicherheit, Inhaltsmanagement sowie Suchfunktionen. Des Weiteren wurden Anforderungen in den Bereichen Kollaborationstools, Analyse und Bewertung, Skalierbarkeit, Systemintegration und Barrierefreiheit definiert. Eine Spezifikation dieser Anforderungen ist der folgenden Tabelle 26 zu entnehmen:

Tabelle 26: Spezifikationen und Zielsetzungen des Hubs

Kategorie	Spezifikation	Zielsetzung
Usability & UX	Gewährleistung einer intuitiven Benutzeroberfläche (UI) und einer positiven User Experience (UX).	Maximierung der Nutzerakzeptanz und Reduzierung des Schulungsaufwands.
Security & Access Control	Implementierung rollenbasierter Zugriffskontrollen (RBAC) sowie moderner Verschlüsselungsstandards.	Umfassender Schutz sensibler Daten und Einhaltung von Compliance-Richtlinien.
Content Management	Multimediale Unterstützung für diverse Dateiformate inklusive effizienter Asset-Verwaltung und Upload-Workflows.	Strukturierte Organisation und einfache Bereitstellung von Wissen und Medien.
Search Engine	Integration einer leistungsstarken Volltextsuche mit Filter- und Indexierungsfunktionen.	Reduzierung von Suchzeiten und effizientes Auffinden relevanter Informationen.
Collaboration	Bereitstellung von Social-Collaboration-Features wie Echtzeit-Chat, Foren und kollaborativen Arbeitsgruppen.	Förderung des internen Wissensaustauschs und Stärkung der interdisziplinären Zusammenarbeit.
Analytics & Reporting	Implementierung von Tracking-Tools zur Erfassung von Nutzeraktivitäten und Generierung von KPI-Dashboards.	Datengestützte Bewertung der Systemnutzung und Ableitung von Optimierungsmaßnahmen.
Skalierbarkeit	Gewährleistung der Systemperformance und Stabilität bei steigenden Datenmengen und Nutzerzahlen.	Zukunftssicherheit und Hochverfügbarkeit der Plattform im Wachstumsszenario.
Systemintegration	Bereitstellung von Schnittstellen (APIs) zur nahtlosen Anbindung an Drittsysteme (z.B. ERP, CRM, MS 365).	Vermeidung von Datensilos und Schaffung eines integrierten digitalen Ökosystems.
Accessibility	Einhaltung internationaler Standards zur Barrierefreiheit (z. B. WCAG 2.1).	Diskriminierungsfreier Zugang für alle Nutzergruppen unabhängig von körperlichen Einschränkungen.

Die Liste der Anforderungen wurden zusätzlich verwendet, um eine Leistungsbeschreibung zu erstellen. Die Leistungsbeschreibung definierte den Umfang des Unterauftrags, welches zur Erstellung des Hubs ausgeschrieben wurde. Zusätzlich wurde eine mehrdimensionale Referenzarchitektur gebaut (Abbildung 57), welche die Architektur des Mobilkreis Hubs aus einer Komponentensicht und einer Funktionssicht beschreibt.



Abbildung 57: Komponentensicht der Referenzarchitektur

Die Abbildung zeigt die grundlegende, dreigeteilte High-Level-Struktur des Systems. Auf der linken Seite sind die primären Interessengruppen definiert, die sich aus übergeordneten Institutionen, wirtschaftlichen Akteuren wie Konzernen, KMUs und Start-Ups sowie der Forschung in Form von Universitäten, Hochschulen und Forschungsinstituten zusammensetzen. Der mittlere Bereich visualisiert die zentralen Bausteine des Hubs, zu denen ein Contentmanagement für fachrelevante Beiträge, Funktionen zur Analyse und Bewertung durch Leistungskennzahlen sowie vielfältige Kollaborationsmöglichkeiten wie Events und Matching-Programme gehören. Diese Kernfunktionen stützen sich auf ein horizontales Fundament aus Zugriffssteuerung und Datensicherheit. Auf der rechten Seite wird das Web-Frontend dargestellt, welches in spezifische Arbeitsbereiche für die verschiedenen Nutzerrollen unterteilt ist, namentlich Administratoren, DIONA, den Mobilkreis Mitgliedern und externe Nutzer.

Die Funktionsbereiche der MobilKreis-Referenzarchitektur werden in Abbildung 58 dargestellt. Sie bietet einen tieferen Einblick in die funktionale Architektur und das Zusammenspiel der einzelnen Systemmodule. Das gesamte System wird dabei von einem äußeren Rahmen umschlossen, der im oberen Bereich aus Verwaltung und Support sowie im unteren Bereich aus der Datensicherheit besteht. Im Zentrum des Modells stehen die Nutzer aus den Bereichen Forschung und Wirtschaft. Links von diesem Nutzerzentrum befindet sich der Kollaborationsformate, welche Aktivitäten wie Eventmanagement, Matching-Programme, Kooperationen, Wissenstransfer und virtuelle Kommunikation umfasst. Auf der rechten Seite befindet sich die Datenverarbeitungssicht. Sie besteht aus einem Data Lake, welches mit Datenvisualisierungstools sowie Kollaborationstools für die Datenvisualisierung und den Datenaustausch verknüpft ist.

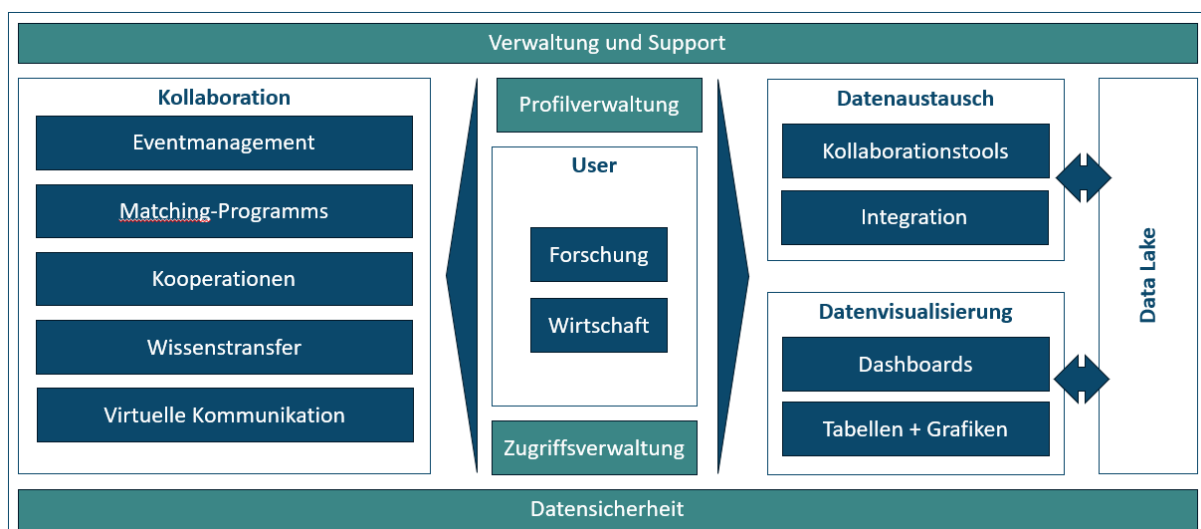


Abbildung 58: Funktionsbereiche der Referenzarchitektur

Der Funktionsbereich Kollaboration (Abbildung 59: Kollaborationslebenszyklus nach (Tellioglu)) führt zudem eine prozessuale Sicht ein. Dieser Kollaborationsprozess repräsentiert den sogenannten Collaboration Life Cycle, welcher die interdisziplinäre Zusammenarbeit in vier aufeinanderfolgende Phasen strukturiert: den Beginn mit der Initiation, gefolgt von der Formation, der produktiven Operation und schließlich der Dekomposition.

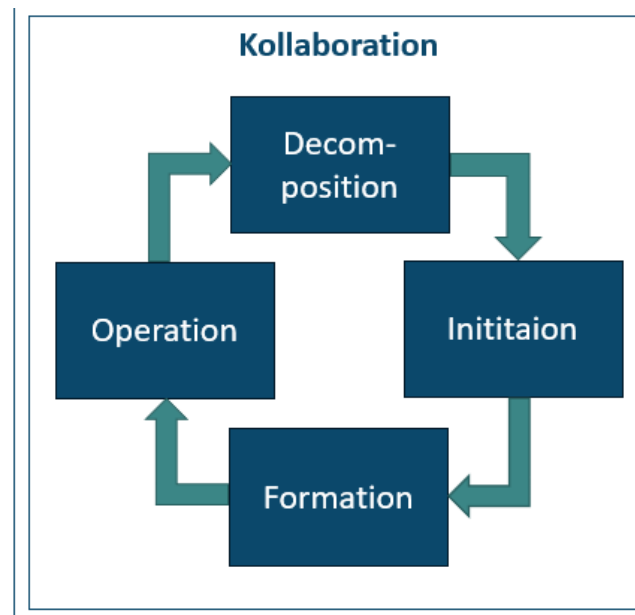


Abbildung 59: Kollaborationslebenszyklus nach (Tellioglu)

Das Kollaborationskonzept des digitalen Hubs orientiert sich maßgeblich an dem wissenschaftlich fundierten „Collaboration Life Cycle“ (CLC), den Hilda Tellioglu von der Technischen Universität Wien als methodisches Rahmenwerk zur Systematisierung koordinierter Zusammenarbeit entwickelt hat. Dieses Modell findet in der DIONA-Referenzarchitektur eine direkte Anwendung und unterteilt die interdisziplinäre Kooperation in vier aufeinanderfolgende Phasen.

Es beginnt mit der Initiierung (Initiation), in der aus einer ersten Idee ein konkreter Zusammenarbeitsbedarf abgeleitet und eine entsprechende Arbeitsgruppe durch die Identifikation und Einladung potenzieller Mitglieder formiert wird. In der anschließenden Formierungsphase (Formation) werden die gemeinsamen Ziele präzisiert, individuelle Rollen definiert und die notwendige IT-Infrastruktur sowie die Aufgabenverteilung innerhalb der koordinierten Arbeitsumgebung etabliert. Die eigentliche Kernarbeit erfolgt in der Durchführungsphase (Operation), welche durch den kontinuierlichen Austausch von Informationen, die Sicherung von Zwischenergebnissen sowie ein aktives Change-Management geprägt ist. Den Abschluss bildet die Auflösung (Decomposition): Sobald die Ziele erreicht sind, werden die Ergebnisse veröffentlicht und die spezifische Arbeitsumgebung abgebaut, wobei das Framework explizit betont, die Kontakte für eine nachhaltige Vernetzung über das Projektende hinaus aufrechtzuerhalten.

Für die praktische Umsetzung differenziert die Publikation zudem zwischen zwei strategischen Ansätzen: Während der workflow-basierte CLC auf streng vordefinierte, logisch aufeinanderfolgende Prozesse setzt, ist der artefakt-basierte CLC für dynamische Umgebungen konzipiert, in denen die Koordination ad-hoc durch die gemeinsame Arbeit an Dokumenten oder Modellen erfolgt. Insgesamt bietet dieses wissenschaftliche Modell Projektverantwortlichen somit nicht nur eine Struktur für den Aufbau maßgeschneiderter Kooperationsumgebungen, sondern fungiert gleichzeitig als wertvolles Analysewerkzeug, um bestehende Prozesse hinsichtlich ihrer Effizienz, Kommunikation und technischen Unterstützung gezielt zu optimieren.

Die folgende Grafik zeigt, wie das Kollaborationskonzept für das Mobilkreis-Konsortium sowie externe Stakeholder aufgebaut war. Die Transfertreffen unterstützten in der Initiierungsphase, um den Kollaborationsbedarf festzulegen. Auch wurden Kollaborationsbedürfnisse durch das DIONA-Forschungsteam bei Industriekonferenzen, Workshops und Netzwerkveranstaltungen erfasst, auf dessen die im Rahmen von DIONA erstellten Workshops aufgebaut sind. In der Formationsphase ist eine Leistungsbeschreibung und eine Referenzarchitektur erstellt worden, die zusammen das

Rahmenwerk für den Mobilkreis-Hub abbilden. Die Leistungsbeschreibung wurde zusätzlich dafür verwendet, einen Unterauftrag auszuschreiben, welcher zum Aufbau der digitalen Komponenten des Hubs diene. Die Operation- und Dekompositionsphasen werden näher in AP2.3 und AP2.4 zum Betrieb des Hubs beschrieben. Sie umfassen eine Auswertung der Hub Nutzung und erklären, wie der Hub nach Ende des Projektes fortgeführt werden kann.

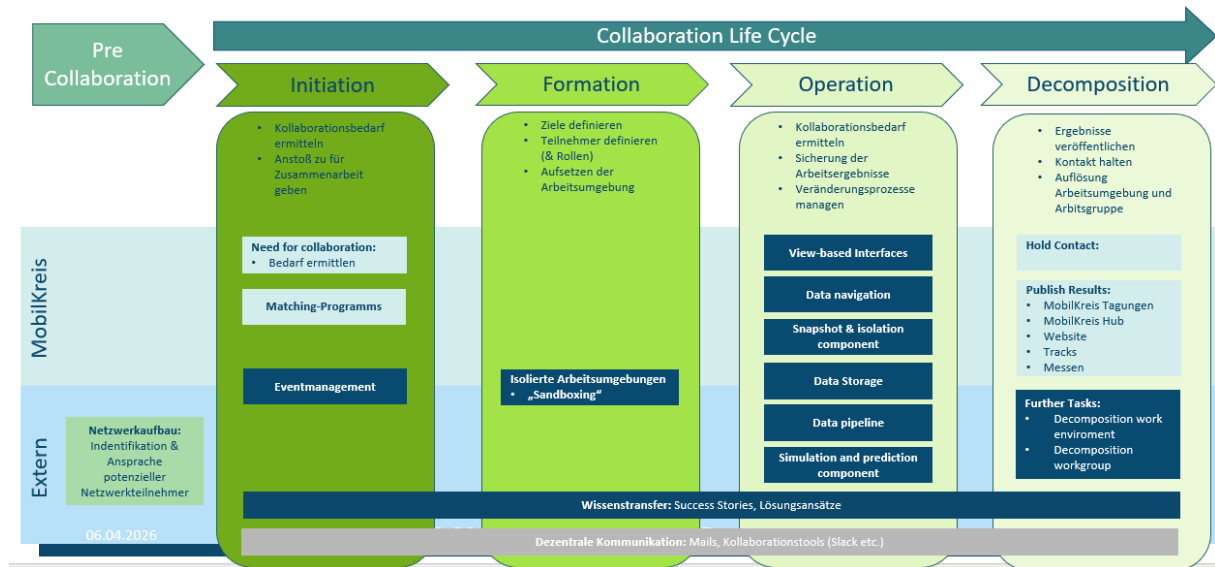


Abbildung 60: Kollaborationslebenszyklus für den Mobilkreis-Hub

Der Hub bietet eine breite Palette an Beitragstypen. Es können Neuigkeiten miteinander geteilt werden, in denen auf Sammelbände von Tagungen, an denen MobilKreis beteiligt war, wie der zweiten MobilKreis-Tagung, aufmerksam gemacht wurde. Außerdem wurde über die Neuigkeits-Funktion auf Kurzvideos zu den Themen Mobilität der Zukunft oder KI in der Produktentwicklung (sogenannte „TechTalks“ der Technischen Universität Braunschweig) hingewiesen, sowie über neue Ausschreibungen zur CE informiert. Ebenfalls fanden Neuigkeiten zu Veranstaltungen wie Workshops und den MobilKreis-Tagungen ihren Platz auf dem Hub, welche auch durch den eigenen Beitragstyp *Veranstaltung* sichtbar gemacht werden können. Durch den Beitragstyp *Download* bleiben die Präsentationen der Teilnehmenden auch nach den Tagungen noch einsehbar, um von den Forschungsergebnissen zeit- und ortsunabhängig profitieren zu können. Auch Erkenntnisse aus Papern außerhalb der MobilKreis-Tagungen sind durch Downloads zugänglich, einige davon auch aufbereitet zu E-Learning-Kursen (Beitragstyp *Training*), die Voiceovers und Quizzes integrieren, um Wissen leichter zu vermitteln und es tiefer zu verinnerlichen. Durch Umfragen können direkt die Informationen der Nutzenden zu z. B. Benchmarks eingeholt werden.

Insgesamt wird eine Vielfalt an downloadbaren Beiträgen zu Themen der CE geboten, mit besonderem Fokus auf kreislauffähige Mobilität, durch viele verschiedene thematische Ausrichtungen der MobilKreis-Projekte und externer Beitragender. Zu den Themen gehören automatisierte Demontage, digitale Technologien für eine nachhaltige Produktentwicklung, datenbasierte Nachhaltigkeitsoptimierung, Benchmarks für eine nachhaltige Automobilindustrie, digitale Technologien im GPM, Best Practices der CE in der Automobilindustrie, Normung in der CE, Design für die Demontage, Bewertung für End-of-Life-Strategien, sowie Produkte und Geschäftsmodelle innovativ für die CE gestalten. Weitere Downloads umfassen die Entscheidungsunterstützung für die Entwicklung von Fahrzeugkomponenten, datengetriebene Demontage von Fahrzeugbatterien und die Automatisierung der Entschraubung von Motoren. Die angebotenen Trainings inklusive Tonspur und Quizzes werden über Grundlagen der CE und Datenräume als Befähiger für Nachhaltigkeit angeboten.

6.5.2 Auswertung und Learnings

Durch wachsende Vernetzung und neue technologische Möglichkeiten schaffen digitale Plattformen den Rahmen für den Austausch von Daten und Kommunikation (Weber et al.). Dabei zeigt sich aber auch, dass einige Plattformen ein stabiles und wachsendes Ökosystem aufbauen, während andere Plattformen dies nicht erreichen (Asadullah et al. 2018). Die Bewertung und Analyse digitaler Plattformen und ihrer Abläufe entwickelt sich in den letzten Jahren zu einem wichtigen Forschungsschwerpunkt (Rojahn und Gronau 2024). Dabei werden zunehmend Indikatoren identifiziert, die zum Erfolg von Plattformen führen (Böttcher et al. 2022). Um eine erfolgreiche Plattform aufzubauen, muss das Design auf die Ziele ausgerichtet und angepasst werden, damit diese Nutzer anzieht und bindet (Parker et al. 2017).

Auch für den Digital Hub, dessen primäres Ziel die Vernetzung und der Wissenstransfer ist, spielt die Analyse eine zentrale Rolle. In diesem Zusammenhang wird der Digital Hub als Digitale Plattform betrachtet. Dessen zentrales Ziel ist es, die Verbundprojekte im MobilKreis zu vernetzen und Wissen auszutauschen. Darüber hinaus Archivierungsmöglichkeit von Informationen dienen. Um dieses Ziel zu erreichen, wurde ein Analytics Bereich etabliert und Auswertungen durchgeführt. Hierdurch wurden zentrale Bewertungskriterien sichtbar und der datengestützte Vergleich möglich. Darauf basierend konnten fundierte Entscheidungen bei der Auswahl und Weiterentwicklung der Plattform vorgenommen werden (Bernhard et al. 2007).

Allerdings unterscheidet sich die Bewertung grundlegend von klassischen, marktorientierten Plattformen. Ein unmittelbarer, monetär messbarer Return-on-Investment steht hier nicht im Vordergrund (Förderer 2021). Der Mehrwert des MobilKreis Digital Hubs entfaltet sich vielmehr in Dimensionen, die sich einer rein betriebswirtschaftlichen Berechnung entziehen, etwa in der Qualität des fachlichen Austauschs, der Beschleunigung von Innovationsprozessen, dem Aufbau tragfähiger Netzwerke oder der Stärkung kollektiver Wissensbestände (Crupi et al. 2020). Neue Nutzer werden sich dennoch nur dann einer Plattform anschließen, wenn der wahrgenommene Nutzen der Teilnahme die entstehenden Kosten, sei es in Form von Nutzungsgebühren, zeitlichem Aufwand oder Einarbeitungskosten, trägt oder übersteigt (Förderer, 2022).

Entscheidend ist dabei das Prinzip der kritischen Masse. Auf beiden Seiten der Plattform muss eine ausreichende Anzahl aktiver Teilnehmer erreicht werden, damit indirekte Netzwerkeffekte ihre Wirkung entfalten können (Durst und Sandler 2023; Evans 2009). Für eine Wissensplattform bedeutet

dies konkret: Erst wenn genügend Fachexperten, Organisationen und Interessierte aktiv Inhalte teilen, diskutieren und nachfragen, entsteht jene Dynamik, die den eigentlichen Wert der Plattform ausmacht. Bis zum Erreichen dieses Schwellenwertes wirken die Netzwerkeffekte gegen die Plattform. Es fehlt an Inhalten, an Interaktion und damit an Anreizen für neue Nutzer, sich anzuschließen. Gerade bei der Einführung einer Wissensplattform stellt dies eine besondere Herausforderung dar, da der Nutzen nicht in unmittelbaren Umsätzen sichtbar wird, sondern sich erst langfristig in einem wachsenden, lebendigen Wissensökosystem manifestiert. Eine nachhaltige Existenz der Plattform ist daher nur möglich, wenn die Schwelle der kritischen Masse erreicht und dauerhaft überschritten wird (Durst & Sandler, 2023; Förderer, 2022).

Abschließende Analytics

Die abschließende Auswertung der Daten von Anfang Dezember 2025 umfasst insgesamt 122 Einträge. Die vorliegenden Auswertungen zeichnen ein konsistentes Gesamtbild der Nutzeraktivität und der Verteilung von Inhalten, veranschaulicht in Abbildung 61. Betrachtet man zunächst die durchschnittliche Aktivität pro Nutzer, so zeigt sich, dass Nutzer im Mittel rund 24,6 Beiträge ansehen, jedoch lediglich etwa 1,6 Likes vergeben. Dieses deutliche Gefälle weist darauf hin, dass ein Großteil der Nutzung passiv erfolgt, während aktive Interaktionen vergleichsweise selten sind.

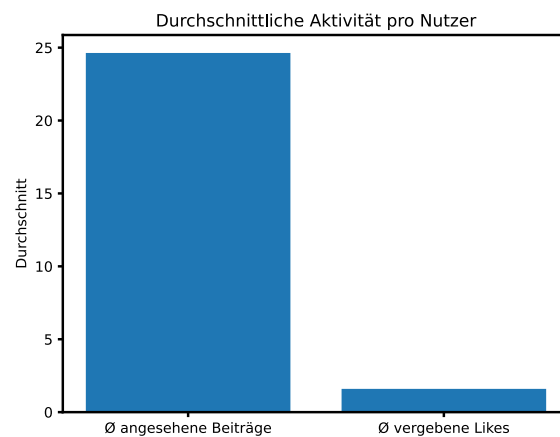


Abbildung 61: Nutzeraktivität

Dieses Muster wird durch die Analyse der Beteiligung am Vergeben von Likes weiter gestützt (Abbildung 62). Von insgesamt 156 Nutzern haben nur 20 überhaupt mindestens einen Like vergeben. Das bedeutet, dass lediglich ein kleiner Teil der Nutzer aktiv zur Interaktion beiträgt, während die große Mehrheit keine Likes vergibt. Die Interaktion konzentriert sich somit auf eine sehr begrenzte Nutzergruppe.

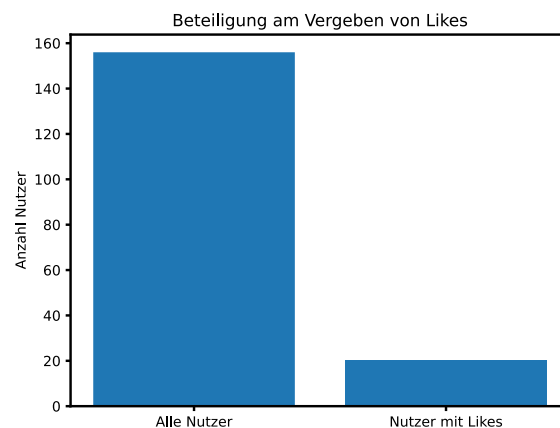


Abbildung 62: Beteiligung an Likes

Der Vergleich der durchschnittlichen Likes (Abbildung 63) verdeutlicht diese Konzentration zusätzlich. Während der Durchschnitt über alle Nutzer hinweg bei etwa 1,6 Likes liegt, beträgt der Durchschnitt bei denjenigen Nutzern, die überhaupt Likes vergeben haben, rund 12,45. Daraus lässt sich ableiten,

dass die wenigen aktiven Nutzer überdurchschnittlich viele Likes vergeben und somit einen Großteil der gesamten Interaktionen erzeugen.

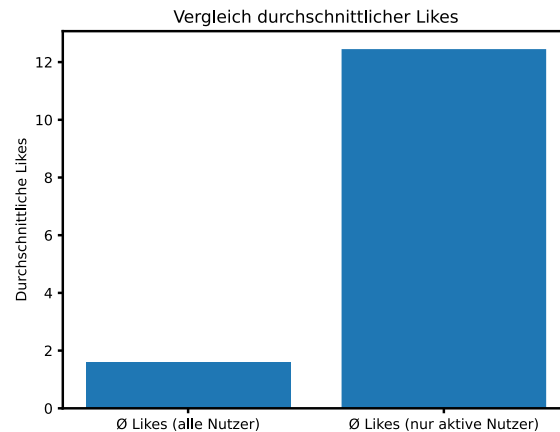


Abbildung 63: Vergleich durchschnittlicher Likes

In Bezug auf die Gesamtmenge zeigt die Gegenüberstellung von Likes insgesamt und Nutzerbasis, dass 249 Likes von 156 Nutzern generiert wurden (Abbildung 64). Auch hier wird deutlich, dass die durchschnittliche Aktivität im Verhältnis zur Nutzerzahl eher gering ist, was im Einklang mit der zuvor beschriebenen ungleichen Verteilung der Interaktionen steht.

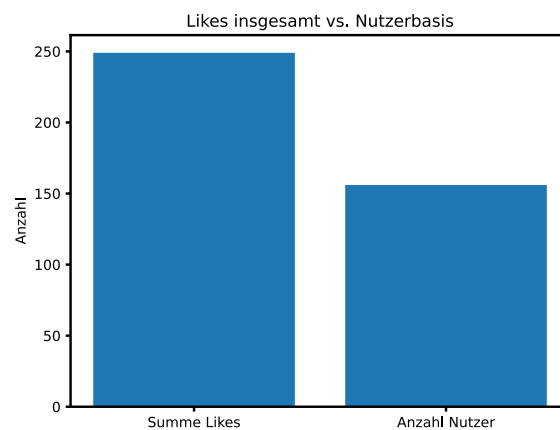


Abbildung 64: Likes insgesamt und auf Nutzerbasis

Ergänzend dazu liefert die Analyse der Häufigkeit der Inhaltstypen (Abbildung 65) einen Einblick in die strukturelle Zusammensetzung der Inhalte. Mit 75 Einträgen dominieren „DOWNLOAD“-Inhalte klar, gefolgt von „NEWS“ mit 38 Einträgen. Andere Formate wie „TRAINING“, „MEETING“ und „POLL“ treten nur vereinzelt auf. Insgesamt deutet dies auf einen starken Fokus auf konsumorientierte Inhalte hin, während interaktive oder kollaborative Formate nur eine untergeordnete Rolle spielen.

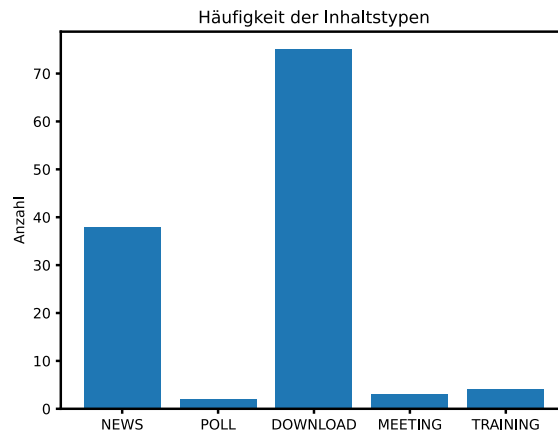


Abbildung 65: Häufigkeit der Inhaltstypen

Zusammenfassend ergibt sich ein stimmiges Bild: Die Nutzung ist überwiegend passiv geprägt, Interaktionen konzentrieren sich auf wenige Nutzer, und die bereitgestellten Inhalte sind stark auf Konsum ausgerichtet. Aussagen über Ursachen oder Wirkzusammenhänge lassen sich aus den vorliegenden aggregierten Daten jedoch nicht ableiten, da hierfür weiterführende Informationen erforderlich wären.

Learnings und Best Practises

DIONA versuchte klassische Probleme wie einen Kaltstart zu umgehen. Zunächst wurde versucht Inhalte aufzubauen durch den Upload eigener Inhalte. In einem zweiten Schritt wurde versucht, den Hub mit Inhalten aus den Verbundprojekten durch gezielte Ansprache und Rundmails mit Inhalten zu befüllen. Dieser Inhaltspool sollte die Grundlage dafür bilden, dass weitere Nutzer auf die Plattformen kommen und einen Nutzen hiervon hätten. Erst nach diesen beiden Schritten wurde sich entschlossen im Projekt den Hub für Dritte zu öffnen.

Aufgrund der Nutzerzahlen muss davon ausgegangen werden, dass Potenziale der Zielgruppe als Nutzer nicht gehoben werden konnten. Im Laufe des Projektes wurde versucht, Dritte wie Forschungseinrichtungen, Netzwerke, Firmen und Einzelpersonen gezielt anzusprechen, um diese auf die Plattform zu bringen. Hierfür wurden E-Mails und LinkedIn Anfragen versendet mit Informationen zum Hub und den Mehrwerten für die Zielgruppe. Die Akquisemaßnahmen zeigten Wirkung, durch den hinzugewinn einzelner Nutzer ab Start der Maßnahmen. Professionellere und standardisierte Abläufe in Kombination mit einer noch stärkeren individualisierten Ansprache, hätten weitere Erfolge bringen können.

Es gab regelmäßige Impulse in Form von Events (z.B. MobilKreis Tagungen, Circularity Days), doch deren Wirkung blieb offenbar begrenzt. Mögliche Ursachen sind eine zu geringe Frequenz, ein zu breites oder zu wenig ansprechendes Themenspektrum, mangelnde Nachbereitung auf der Plattform oder eine fehlende Verknüpfung zwischen Event und Hub – sodass die Events zwar stattfanden, aber keinen nachhaltigen Traffic auf die Plattform lenkten. Events sollten noch systematischer als Treiber für die Plattformnutzung eingesetzt werden. Jedes Event sollte vor- und nachbereitet werden: vorher durch Diskussionsthreads und Ankündigungen auf der Plattform, nachher durch die Bereitstellung von Aufzeichnungen, Zusammenfassungen und weiterführenden Diskussionen exklusiv auf dem Hub. So entsteht ein wiederkehrender Grund, die Plattform zu besuchen. Zudem hätte geprüft werden können, ob kürzere, häufigere Formate (z. B. monatliche 30-minütige Impulssessions) mehr Wirkung erzielen als seltene Großveranstaltungen. Dies wurde zu Beginn des Projekts MobilKreis-intern durchgeführt, wurde aufgrund des damaligen Feedbacks wieder verworfen. Eine spätere Etablierung mit einer anderen Zielgruppe (z.B. kleine und mittelständische Unternehmen) wäre eine neue Möglichkeit gewesen.

Inhalte wurden auf der Plattform bereitgestellt, aber es entstand kein echter Dialog. Die Kommunikation blieb einseitig wodurch kein lebendiger Austauschort auf dem Hub entstanden ist. Ohne diese Interaktion fehlt der soziale Faktor, der Nutzer bindet und zum Wiederkommen motiviert. Für diesen Community-Aufbau und -Pflege wäre mehr Zeit und Aufmerksamkeit, die im Rahmen von DIONA nur begrenzt zur Verfügung standen, notwendig gewesen. Dies resultierte in einer geringen Kontinuität, um regelmäßig Diskussionen anzustoßen, neue Nutzer persönlich abzuholen und die

Plattform als lebendigen Austauschort zu etablieren. Diese Erfahrung verdeutlicht, wie entscheidend eine gezielte Betreuung der Community für den Erfolg einer Wissensplattform ist. Daher sollten künftige Vorhaben ein eigenständiges Community-Management als feste Rolle im Projektteam etablieren. Die Aufgaben können dabei je nach Projektgröße variieren. Es sollten neue Nutzer begrüßt und eingeführt, Diskussionen initiiert, Inhalte kuratiert, Feedback einsammelt und die Brücke zwischen Plattform und Offline-Aktivitäten geschlagen werden.

In diesem Zusammenhang wären auch Maßnahmen zum gezielten Setzen von Anreizen eine Möglichkeit gewesen, die Nutzer zu aktivieren. Mögliche Maßnahmen wären gewesen: sichtbare Aktivitätsprofile (z. B. „Top-Beitragende des Monats“), Badges für bestimmte Aktionen (erster Beitrag, zehn Kommentare, Profil vollständig ausgefüllt), exklusive Einladungen zu Veranstaltungen für besonders aktive Nutzer oder die Möglichkeit, als Experte auf der Plattform sichtbar zu werden. Entsprechende Maßnahmen wurden projektintern diskutiert, aber mit in Hinblick auf Aufwände und mögliche Auswirkungen von Fehlschlägen verworfen.

Erste Ansätze einer Go-to-Market-Strategie waren vorhanden, konnten jedoch im Projektverlauf nicht vollständig ausreifen. So war die Plattform zunächst nur für den internen MobilKreis gedacht und erst nach dem erfolgreichen Aufbau eines grundständigen Angebots gegenüber Dritten geöffnet. Jedoch muss anerkannt werden, dass der enge Zeitrahmen und die parallelen Anforderungen aus Entwicklung, Inhaltsaufbau und Projektkoordination wenig Raum ließen, um die „Markteinführung“ so systematisch vorzubereiten und zu begleiten, wie es für eine nachhaltige Nutzergewinnung nötig gewesen wäre. Dies ist kein ungewöhnliches Phänomen bei forschungsnahen Plattformprojekten, zeigt aber, wie wichtig eine frühzeitige und dedizierte Planung der Nutzeransprache ist. Künftige Projekte könnten davon profitieren, eine ausgereifere Go-to-Market-Strategie als eigenständigen Arbeitsstrang zu entwickeln, der parallel zur technischen Entwicklung vorangetrieben wird.

Potenzielle Nutzer wurden im Vorfeld interviewt, um Anforderungen für die Entwicklung des Hubs zu erheben. Es liegen jedoch keine belastbaren Daten dazu vor, ob und welche Einstiegshürden, etwa eine komplizierte Registrierung oder eine unübersichtliche Oberfläche, Nutzer abgeschreckt haben könnten. Eine Nutzerbefragung fand nicht statt und Optimierungspotenziale konnten in dieser Richtung nicht gehoben werden.

Auch das Fehlen von Onboarding Prozessen konnte nicht als Problem festgestellt werden. Die Verbundprojektleiter erhielten eine Demo zur Plattform. Andere Nutzer erhielten diese Einweisung nicht, jedoch wurde bei der Umsetzungslösung auch auf einer bestehenden und umfassenden evaluierten Lösung aufgesetzt. Auch dieser Punkt wurde nicht bei den Nutzenden abgefragt.

In einem Zeitraum von ca. 2 Jahren fanden der Aufbau und die Etablierung der Plattform statt. Dieser Zeitraum kann im Nachgang als zu knapp bemessen eingeschätzt werden, um eine tragfähige Nutzerbasis aufzubauen, Vertrauen in der Zielgruppe zu schaffen und organisches Wachstum zu erzeugen. Künftige Projekte sollten mit langfristigeren Zeithorizonten insbesondere beim Aufbau der Community einplanen.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass der Hub die wesentlichen Ziele erfüllt hat, eine wirkliche kritische Masse auf der Plattform aber nicht etabliert werden konnte. Künftige Projekte sollten die gewonnenen Learnings und Best Practises berücksichtigen, um noch erfolgreicher Nutzer zu finden, zu gewinnen und an sich zu binden.

6.6 Website und Social Media Auftritt

6.6.1 Website von DIONA und MobilKreis

Im Rahmen des wissenschaftlichen Projekts wurde eine umfassende Website (<https://mobilkreis.de/>), welche bis Ende September 2026 verfügbar ist, entwickelt und eingerichtet, die als zentrale Anlaufstelle für Interessierte aus den Bereichen CE im Automotive-Bereich dient. Für die Website wurde zunächst ein Wireframe erstellt, der als Grundgerüst einem Dienstleister kommuniziert und dann umgesetzt wurde. Die Website richtet sich sowohl an Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler als auch an Fachkräfte aus Unternehmen, die sich mit der Transformation hin zu einer kreislaforientierten Wirtschaft beschäftigen. Ergänzend zu anderen Kommunikationskanälen wie dem MobilKreis Hub (<https://hub.mobilkreis.de/>, verfügbar bis Ende September 2026) und Beiträgen auf LinkedIn bietet die Website eine strukturierte Übersicht über das MobilKreis-Konsortium sowie dessen vielfältige Projekte.

Ein zentraler Bestandteil der Website ist die Vorstellung des MobilKreis-Konsortiums, einschließlich detaillierter Einblicke in einzelne Projekte wie DIONA sowie weitere Initiativen des Konsortiums. Besucherinnen und Besucher erhalten hierdurch die Möglichkeit, gezielt Informationen zu den Themenbereichen abzurufen, die für ihre individuellen Interessen oder beruflichen Herausforderungen relevant sind.

Darüber hinaus informiert die Website über von DIONA organisierte Veranstaltungen wie Tagungen und Workshops. Neben allgemeinen Veranstaltungsinformationen werden dort auch Möglichkeiten zur Anmeldung sowie Rückblicke auf vergangene Veranstaltungen bereitgestellt. Diese Funktionalitäten tragen dazu bei, den Austausch zwischen Wissenschaft und Praxis weiter zu fördern und eine stärkere Vernetzung innerhalb der Community zu unterstützen.

Die Inhalte der Website werden kontinuierlich erweitert und aktualisiert. Bereits implementierte interaktive Elemente wie ein R-Strategien Memory oder eine 360°-Karte der beteiligten MobilKreis-Projekte bieten den Nutzerinnen und Nutzern innovative und spielerische Möglichkeiten zur Erkundung relevanter Themenbereiche. Zudem enthält die Seite Verweise auf wissenschaftliche Publikationen sowie Links zu den jeweiligen Projektseiten, um einen einfachen Zugang zu vertiefenden Materialien sicherzustellen.

Durch regelmäßige Pflege und Weiterentwicklung stellt die Website nicht nur einen informativen Zugangspunkt dar, sondern fungiert auch als Plattform zur Förderung des Wissensaustauschs im Bereich CE im Automotive-Bereich.

6.6.2 LinkedIn

Neben der Website als zentraler Ankerpunkt sollten weitere Kommunikationskanäle dazu dienen, Aufmerksamkeit auf diese zu lenken. Hierfür wurde zunächst ein Workshop durchgeführt und eine Communication Roadmap (Abbildung 66) erarbeitet. Diese ermöglichte ein strukturiertes Vorgehen.



Abbildung 66: Communication Roadmap

Die nachfolgenden Ziele wurden definiert und festgehalten:

- Aufbau und Steigerung der Bekanntheit & Reichweite für DIONA, MobilKreis & MobilKreis Digital Hub,
- Vernetzung & Kollaboration,
- Sensibilisierung, Bildung und Förderung der Themen CE in der Automobilindustrie und CE im Allgemeinen“.

Aus diesen Zielen wurden operative Maßnahmen abgeleitet wie die Erstellung eines Content-Pools, Identifizierung geeigneter Instrumente sowie die Generierung und Analyse von Daten, um den Erfolg nachzuweisen. Darauf basierend wurden KPIs festgelegt.

Um die Zielgruppe erreichen zu können, wurden Best Practises ähnlicher Vorhaben recherchiert und aufgearbeitet. Basierend auf diesen Ergebnissen wurde sich dazu entschieden, einen LinkedIn Account aufzubauen (linkedin.com/company/diona-hub/), welcher als weiterer Kommunikationskanal und Anlaufstelle für Interessierte diene.

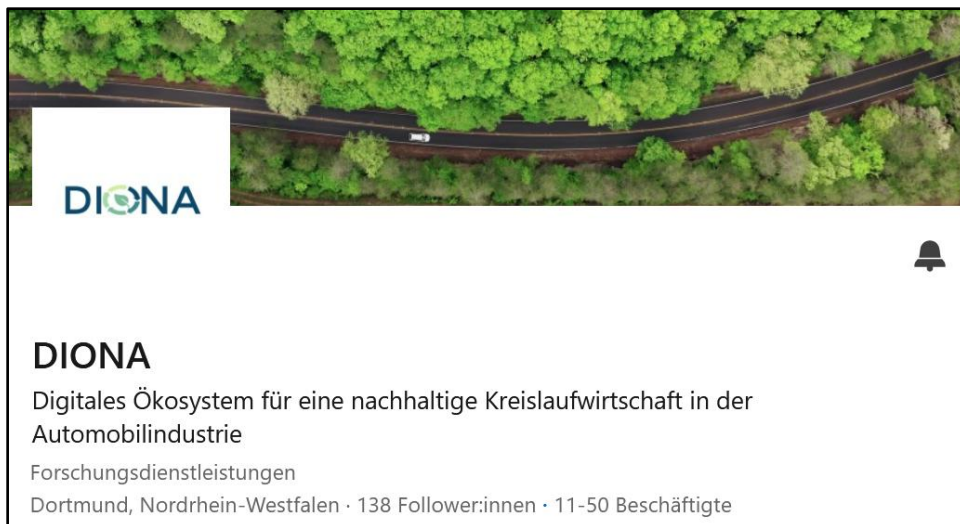


Abbildung 67: LinkedIn DIONA Account (Stand Januar 2026)

Dieses berufliche soziale Netzwerk ermöglichte es dem Projekt direkt mit relevanten Forschern, Praktikern, Entscheidungsträgern und Organisationen zu vernetzen. Darüber hinaus ermöglicht LinkedIn Fachdiskussionen und die Teilnahme an Gruppen, die es DIONA ermöglichen, relevante Themen der CE zu diskutieren, Forschungsergebnisse zu teilen und als Experte in diesem Bereich wahrgenommen zu werden. Interaktionen mit anderen Entitäten im Netzwerk tragen zur Sichtbarkeit des Projekts bei und ermöglichen den Aufbau von Fachwissen innerhalb der LinkedIn-Community.

Im Folgenden werden die Ergebnisse einer Analyse des LinkedIn Auftritts beschrieben. LinkedIn bietet für Unternehmensseite, als welche DIONA angelegt wurde, eigene Analytics Funktionen an. Diese bieten eingeschränkte Einblicke auf Basis einzelner KPIs. Um detailliertere Einblicke zu erhalten, wurde eine umfassende Analyse auf Basis der API-Exportdaten am 30.07.2025 und 16.09.2025 durchgeführt. Diese beiden Datensätze wurden anschließend zusammengeführt. LinkedIn beschränkt den Datenexport auf 365 Tage, weshalb die Analyse den Zeitraum 30.07.2024 – 15.09.2025 umfasst.

Folgende Daten konnten erhoben werden:

- Interaktionen nach Datum: Enthält eine chronologische Auflistung der täglichen Kennzahlen wie Impressionen, Klicks, Reaktionen und Kommentare.
- Beitragsbezogene Kennzahlen: Enthält die einzelnen Beiträge, die über ihre Links eindeutig identifizierbar sind, sowie die dazugehörigen Metriken wie Impressionen, Likes und Kommentare.

In Hinblick auf die Daten muss darauf hingewiesen werden, dass keine Rückschlüsse auf die Stellung der Follower oder von Interagierenden zu lassen. Es liegen keine Informationen in den Daten zugrunde, ob die Accounts MobilKreis Projekten oder wirklichen Externen zugehörig sind. Weiterhin können ohne erweiterte Analytics Funktionen keine Branchenzugehörigkeiten oder Positionen ermittelt werden.

Für die Analyse wurden diese Daten entsprechend bereinigt und reduziert sowie mit ergänzenden Kontextvariablen versehen. Diese anschließende Analyse ergab die nachfolgenden Ergebnisse und ermöglichte weiterführende Interpretationen.

Die Analyse der verschiedenen Inhaltskategorien zeigt deutliche Unterschiede in der Effektivität: Während Beiträge zu projektinternen Themen und zu den MobilKreis-Tagungen die beste Performance erzielten, wies die am häufigsten bediente Kategorie in der Veranstaltungen Dritter mit nur 9 % die geringste Engagement-Rate auf. Aufgrund der begrenzten redaktionellen Möglichkeiten, wurde insbesondere zu Beginn des Accounts Beiträge zu Konferenzen, Fachtagungen u.ä. herangezogen. Hierdurch konnte die Posting-Frequenz gesteigert werden, da der LinkedIn-Algorithmus regelmäßige und planbare Veröffentlichungen honoriert.

Im Gegensatz dazu konnten fachspezifische Inhalte wie „Call-for-Papers“ zwar eine geringere Gesamtreichweite, dafür aber eine überdurchschnittliche Interaktionsrate innerhalb der Fachcommunity erzielen. Hieraus lässt sich das besondere Interesse des wissenschaftlichen Teils der Community an entsprechenden Beiträgen ablesen.

Ein zentrales Ergebnis der Auswertung ist die Erkenntnis, dass direkte Handlungsaufforderungen (Call-to-Actions) bereits erfolgreich eingesetzt wurden, die durchschnittliche Anzahl an Kommentaren mit 0,30 pro Beitrag jedoch noch sehr niedrig ist. Um den Austausch mit der „Community“ weiter zu stärken, sollten Beiträge verstärkt mit gezielten Fragen oder Diskussionsimpulsen beendet werden. Eine weitere Option wäre das direkte Kommentieren und Interagieren mit dem anderen Account in deren Beiträgen gewesen. Hiergegen wurde sich ganz zu Beginn entschieden, um die Aufwände und Koordination zu verringern.

Abschließend wird betont, dass das bereits früh etablierte einheitliche visuelle Erscheinungsbild die Wiedererkennbarkeit der Marke DIONA maßgeblich unterstützt hat. Für die zukünftige Strategie wird daher empfohlen, frühzeitig feste Design-Templates zu entwickeln und bei externen Events eher auf kleinere, thematisch fokussierte Formate zu setzen, da diese tendenziell höhere relative Interaktionsraten generieren als allgemeine Standard-Ankündigungen.

7 Perspektiven und Herausforderungen der Kreislaufwirtschaft

Zusammenfassend zeigt sich im Rahmen der im Projekt DIONA durchgeführten Forschungs- und Vernetzungsaktivitäten ein uneindeutiges Bild hinsichtlich der gesellschaftlichen und wirtschaftlichen Implikationen der Adaption einer CE in der deutschen Automobilindustrie.

Ähnlich wie das Nachhaltigkeitsverständnis ist auch der Begriff der CE nicht eindeutig definiert und wird von unterschiedlichen gesellschaftlichen Akteuren jeweils unterschiedlich interpretiert. Dieses divergierende Begriffsverständnis hat unmittelbare Auswirkungen auf die Einbindung des Menschen in den Transformationsprozess. Insbesondere Abweichungen zwischen dem Verständnis des Managements und dem der übrigen Belegschaft können zu Konflikten führen, wenn individuelles und organisationales Verständnis nicht übereinstimmen. Gleichzeitig zeigt sich jedoch, dass Mitarbeitende bereit sind, Transformationsprozesse zu unterstützen, sofern diese mit einer glaubwürdig vermittelten Vision und einer perspektivischen Beschäftigungssicherheit einhergehen. In solchen Fällen besteht auch die Bereitschaft, bestehende Traditionen und Werte zu hinterfragen oder aufzubrechen.

Darüber hinaus verdeutlicht die Analyse der den CE-Diskurs prägenden R-Strategien, dass vor allem jene Strategien adaptiert werden, die mit dem bestehenden linearen Wirtschaftssystem kompatibel sind und daher überwiegend einem inkrementellen Wandel zuzuordnen sind. Ergänzend zeigt sich, dass insbesondere solche Maßnahmen umgesetzt werden, die primär auf die Erfüllung des gesetzlichen und regulatorischen Mindestniveaus abzielen. Dazu zählen insbesondere Recyclingmaßnahmen zur Wiederverwertung von Produkten, Wasser und Abfällen sowie Reduktionsstrategien zur direkten Verringerung des Primärrohstoffverbrauchs. Andere R-Strategien wie Refurbish oder Remanufacture erfordern hingegen häufig eine umfassendere, gesamtgesellschaftliche Transformation. Diese setzt einen simultanen Wandel von Politik, Wirtschaft und Konsumverhalten voraus sowie eine abteilungsübergreifende Kooperation bislang oft getrennt agierender organisationaler Einheiten, etwa zwischen Produktdesign, Verwertung und insbesondere der Logistik bei der Rückführung gebrauchter Produkte zur Reparatur oder Wiederaufbereitung. Solche Prozesse sind deutlich komplexer zu koordinieren und anzustoßen, weshalb sich bislang überwiegend einzelne Leuchtturmprojekte identifizieren lassen.

Zusätzlich werden transformative CE-Maßnahmen häufig durch ein kurzfristig orientiertes Managementdenken gehemmt. Die ökonomischen, ökologischen und resilienzbezogenen Mehrwerte dieser Maßnahmen entfalten sich in der Regel erst mittel- bis langfristig und setzen eine entsprechende Investitionsbereitschaft- und Risikobereitschaft voraus. Vor dem Hintergrund der aktuell angespannten Lage der deutschen Automobilindustrie werden solche Investitionen im Management jedoch vielfach nachrangig priorisiert.

Ein tiefgreifender transformativer Wandel der deutschen Automobilindustrie in Richtung CE kann daher nur durch ein langfristig ausgerichtetes Denken im Top-Management erreicht werden. Dieses muss sowohl eine stakeholderübergreifende Kooperation mit externen Akteuren wie Politik, Wissenschaft und Start-ups als auch eine enge Zusammenarbeit innerhalb der Unternehmen selbst einschließen. Insbesondere die Einbindung der häufig heterogenen eigenen Belegschaft ist dabei zentral, um die ökonomischen und ökologischen Mehrwerte der CE, etwa in Form von Ressourceneffizienz, Resilienz und Dekarbonisierung, realisieren zu können. Gleichzeitig können dadurch soziale Mehrwerte entstehen, sowohl durch die langfristige Sicherung von Beschäftigung als auch durch neue Arbeitsplätze, die entlang der bestehenden Unternehmen und der Wertschöpfungskette in neuen Abteilungen und Geschäftsfeldern entstehen können.

Literaturverzeichnis

acatech (2016): Industrie 4.0 im globalen Kontext. Strategien der Zusammenarbeit mit internationalen Partnern. München: Herbert Utz Verlag GmbH (acatech STUDIE).

Acerbi, Federica; Järnefelt, Vafa; Martins, Jorge Tiago; Saari, Leila; Valkokari, Katri; Taisch, Marco (2021): Developing a Qualitative Maturity Scale for Circularity in Manufacturing. In: Alexandre Dolgui, Alain Bernard, David Lemoine, Gregor von Cieminski und David Romero (Hg.): *Advances in Production Management Systems. Artificial Intelligence for Sustainable and Resilient Production Systems*, Bd. 632. Cham: Springer International Publishing (IFIP Advances in Information and Communication Technology), S. 377–385.

Adams, Carol A.; Frost, Geoffrey R. (2008): Integrating sustainability reporting into management practices. In: *Accounting Forum* 32 (4), S. 288–302. DOI: 10.1016/j.accfor.2008.05.002.

Adloff, Frank; Neckel, Sighard (2019): Modernisierung, Transformation oder Kontrolle? In: Klaus Dörre, Hartmut Rosa, Karina Becker, Sophie Bose und Benjamin Seyd (Hg.): *Große Transformation? Zur Zukunft moderner Gesellschaften*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, S. 167–180.

Aguilar Esteva, Laura C.; Kasliwal, Akshat; Kinzler, Michael S.; Kim, Hyung Chul; Keoleian, Gregory A. (2021): Circular economy framework for automobiles: Closing energy and material loops. In: *J of Industrial Ecology* 25 (4), S. 877–889. DOI: 10.1111/jiec.13088.

Ahmad, Tahir; van Looy, Amy (2020): Business Process Management and Digital Innovations: A Systematic Literature Review. In: *Sustainability* 12 (17), S. 6827. DOI: 10.3390/su12176827.

Al-Debei, Mutaz M.; Avison, David (2010): Developing a unified framework of the business model concept. In: *European Journal of Information Systems* 19 (3), S. 359–376. DOI: 10.1057/ejis.2010.21.

Al-Debei, Mutaz M.; El-Haddadeh, Ramzi; Avison, David E. (2008): Defining the Business Model in the New World of Digital Business. In: *14th Americas Conference on Information Systems, AMCIS*.

Alistair Cockburn (2000): Structuring Use Cases with Goals. Online verfügbar unter <https://www.semanticscholar.org/paper/Structuring-Use-Cases-with-Goals-Cockburn/61d9a666103ac4115401fc2a92addfa430a35893>.

Ammouriova, Majsja (2021): Approaches to Enhance the Performance of Simheuristic Methods in the Optimisation of Multi-echelon Logistics Distribution Networks. Göttingen: Cuvillier Verlag (Schriftenreihe Fortschritte in der IT in Produktion und Logistik, v.3).

Appelfeller, Wieland; Feldmann, Carsten (2023): *Die Digitale Transformation des Unternehmens*. 2. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Gabler.

APQC (2023): APQC Process Classification Framework (PCF) - Cross Industry - PDF Version 7.3.1. Hg. v. American Productivity & Quality Center. Online verfügbar unter <https://www.apqc.org/resource-library/resource-listing/apqc-process-classification-framework-pcf-cross-industry-pdf-11>.

Arvanitis, Spyros; Sydow, Nora; Woerter, Martin (2008): Is there any Impact of University–Industry Knowledge Transfer on Innovation and Productivity? An Empirical Analysis Based on Swiss Firm Data. In: *Rev Ind Organ* 32 (2), S. 77–94. DOI: 10.1007/s11151-008-9164-1.

- Asadullah, Ahmad; Faik, Isam; Kankanhalli, Atreyi (2018): Evolution Mechanisms for Digital Platforms: A Review and Analysis across Platform Types. In: *ICIS 2018 Proceedings*. Online verfügbar unter <https://aisel.aisnet.org/icis2018/crowd/Presentations/10>.
- Athanasopoulou, Alexia; Reuver, Mark de (2020): How do Business Model Tools facilitate Business Model Exploration? Evidence from Action Research. In: *Electron Markets* 30 (3), S. 495–508. DOI: 10.1007/s12525-020-00418-3.
- Avdiji, Hazbi; Elikan, Dina; Missonier, Stephanie; Pigneur, Yves (2020): A Design Theory for Visual Inquiry Tools. In: *JAIS* 21 (3), S. 695–734. DOI: 10.17705/1jais.00617.
- Axelos (2019): ITIL foundation. ITIL 4 edition. First edition. Norwich: TSO (The Stationery Office).
- Backhaus, Klaus; Erichson, Bernd; Gensler, Sonja; Weiber, Rolf; Weiber, Thomas (2023): *Multivariate Analysemethoden*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.
- Balci, Osman (2007): Verification, Validation, and Testing. In: Jerry Banks (Hg.): *Handbook of Simulation*: John Wiley & Sons, Ltd, S. 335–393.
- Bandara, Wasana; Furtmueller, Elfi; Gorbacheva, Elena; Miskon, Suraya; Beekhuyzen, Jenine (2015): Achieving Rigor in Literature Reviews: Insights from Qualitative Data Analysis and Tool-Support. In: *CAIS* 37. DOI: 10.17705/1CAIS.03708.
- Beck, Roman; Müller-Bloch, Christoph; King, John Leslie (2018): Governance in the Blockchain Economy: A Framework and Research Agenda. In: *JAIS*, S. 1020–1034. DOI: 10.17705/1jais.00518.
- Becker, Jörg; Knackstedt, Ralf; Pöppelbuß, Jens (2009): Developing Maturity Models for IT Management. In: *Bus. Inf. Syst. Eng.* 1 (3), S. 213–222. DOI: 10.1007/s12599-009-0044-5.
- Belk, Russell (2014): You are what you can access: Sharing and collaborative consumption online. In: *Journal of Business Research* 67 (8), S. 1595–1600. DOI: 10.1016/j.jbusres.2013.10.001.
- Bernhard, J.; Jodin, D.; Hömberg, K.; Kuhnt, S.; Schürmann, C.; Wenzel, S. (2007): *Vorgehensmodell zur Informationsgewinnung - Prozessschritte und Methodennutzung*. (Technical Report 06008). Universität Dortmund. Sonderforschungsbereich 559.
- Bocken, N.M.P.; Short, S. W.; Rana, P.; Evans, S. (2014): A Literature and Practice Review to Develop Sustainable Business Model Archetypes. In: *Journal of Cleaner Production* 65, S. 42–56. DOI: 10.1016/j.jclepro.2013.11.039.
- Böttcher, Timo; Bootz, Valentin; Schaffer, Norman; Weking, Jörg; Hein, Andreas (2022): Business Model Configurations for Digital Platform Success - Towards a Typology of Digital Platform Business Models. In: *ECIS 2022 Research-in-Progress Papers*. Online verfügbar unter https://aisel.aisnet.org/ecis2022_rip/34.
- Braun, Anja-Tatjana; Schöllhammer, Oliver; Rosenkranz, Bernd (2021): Adaptation of the business model canvas template to develop business models for the circular economy. In: *Procedia CIRP* 99, S. 698–702. DOI: 10.1016/j.procir.2021.03.093.
- Brendzel-Skowera, Katarzyna (2021): Circular Economy Business Models in the SME Sector. In: *Sustainability* 13 (13), S. 7059. DOI: 10.3390/su13137059.
- Bundesverband CarSharing (2024): Anzahl registrierter Carsharing-Nutzer in Deutschland von 2014-2024 (in Millionen). Statista. Online verfügbar unter <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/324692/umfrage/carsharing-nutzer-in-deutschland/>, zuletzt geprüft am 06.11.2025.
- Centobelli, Piera; Cerchione, Roberto; Chiaroni, Davide; Del Vecchio, Pasquale; Urbinati, Andrea (2020): Designing business models in circular economy: A systematic literature review and research agenda. In: *Bus Strat Env* 29 (4), S. 1734–1749. DOI: 10.1002/bse.2466.

Christ, Michael; Sommer, Bernd (2022): Transformation (sozial-ökologische). In: Daniela Gottschlich (Hg.): Handbuch Politische Ökologie. Theorien, Konflikte, Begriffe, Methoden. Bielefeld: transcript (Edition Politik, Band 110), S. 461–466.

CIRCULAR REPUBLIC; UnternehmerTUM (2025): Circular Economy Start-Up Landscape 2025. Development and Trends in the European Market. Hg. v. CIRCULAR REPUBLIC. München.

Couckuyt, Dries (2018): An Overview of Challenges and Research Avenues for Green Business Process Management. In: Christophe Debruyne, Hervé Panetto, Georg Weichhart, Peter Bollen, Ioana Ciuciu, Maria-Esther Vidal und Robert Meersman (Hg.): On the Move to Meaningful Internet Systems. OTM 2017 Workshops. Cham: Springer International Publishing (Lecture Notes in Computer Science), S. 270–279.

Couckuyt, Dries; van Looy, Amy (2019): Green BPM as a Business-Oriented Discipline: A Systematic Mapping Study and Research Agenda. In: *Sustainability* 11 (15), S. 4200. DOI: 10.3390/su11154200.

Couckuyt, Dries; van Looy, Amy (2020): A systematic review of Green Business Process Management. In: *BPMJ* 26 (2), S. 421–446. DOI: 10.1108/BPMJ-03-2019-0106.

Cram, W. Alec; Templier, Mathieu; Pare, Guy (2020): (Re)considering the Concept of Literature Review Reproducibility. In: *JASIS* 21 (5), S. 1103–1114. DOI: 10.17705/1jais.00630.

Crupi, Antonio; Del Sarto, Nicola; Di Minin, Alberto; Gregori, Gian Luca; Lepore, Dominique; Marinelli, Luca; Spigarelli, Francesca (2020): The digital transformation of SMEs – a new knowledge broker called the digital innovation hub. In: *JKM* 24 (6), S. 1263–1288. DOI: 10.1108/JKM-11-2019-0623.

Dagenais, Christian; Dargis-Damphousse, Luc; Dutil, Julie (2011): The Essential Skills Series in Evaluation: Assessing the Validity of the ESS Participant Workshop Evaluation Questionnaire. In: *Canadian Journal of Program Evaluation* 26 (2), S. 89–100. DOI: 10.3138/cjpe.26.006.

Dell'Ambrogio, Siro; Menato, Silvia; Nika, Jennifer; Canetta, Luca; Sorlini, Marzio (2022): Design of circular economy enhancing journeys for automotive manufacturing industry. In: 2022 IEEE 28th International Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE/ITMC) & 31st International Association For Management of Technology (IAMOT) Joint Conference. 2022 IEEE 28th International Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE/ITMC) & 31st International Association For Management of Technology (IAMOT) Joint Conference. Nancy, France, 19.06.2022 - 23.06.2022: IEEE, S. 1–6.

Desore, Anupriya; Narula, Sapna A. (2018): An overview on corporate response towards sustainability issues in textile industry. In: *Environ Dev Sustain* 20 (4), S. 1439–1459. DOI: 10.1007/s10668-017-9949-1.

Diaz, Carlos Alberto Barrera; Aslam, Tehseen; Ng, Amos H. C. (2021): Optimizing Reconfigurable Manufacturing Systems for Fluctuating Production Volumes: A Simulation-Based Multi-Objective Approach. In: *IEEE Access* 9, S. 144195–144210. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3122239.

Dombrowski, Uwe; Fochler, Simon; Malorny, Constantin (2020): After Sales Service. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Durst, Carolin; Sandler, Alina (2023): Markteintrittsstrategien für digitale Plattform-Geschäftsmodelle. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.

Dwivedi, Yogesh K.; Hughes, Laurie; Baabdullah, Abdullah M.; Ribeiro-Navarrete, Samuel; Giannakis, Mihalis; Al-Debei, Mutaz M. et al. (2022): Metaverse Beyond the Hype: Multidisciplinary Perspectives on Emerging Challenges, Opportunities, and Agenda for

Research, Practice and Policy. In: *International Journal of Information Management* 66 (1), S. 102542. DOI: 10.1016/j.ijinfomgt.2022.102542.

Eisenreich, Anja; Füller, Johann; Stuchtey, Martin; Gimenez-Jimenez, Daniela (2022): Toward a circular value chain: Impact of the circular economy on a company's value chain processes. In: *Journal of Cleaner Production* 378, S. 134375. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.134375.

Eley, Michael (2012): Simulation in der Logistik. Einführung in die Erstellung ereignisdiskreter Modelle unter Verwendung des Werkzeuges "Plant Simulation". Dordrecht: Springer (Springer-Lehrbuch).

Elia, Valerio; Gnani, Maria Grazia; Tornese, Fabiana (2020): Evaluating the adoption of circular economy practices in industrial supply chains: An empirical analysis. In: *Journal of Cleaner Production* 273, S. 122966. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.122966.

Ellen MacArthur Foundation (2013): TOWARDS THE CIRCULAR ECONOMY. Online verfügbar unter <https://content.ellenmacarthurfoundation.org/m/27265af68f11ef30/original/Towards-the-circular-economy-Vol-1.pdf>.

Ellen MacArthur Foundation (2024): Building a circular supply chain. Online verfügbar unter https://www.ellenmacarthurfoundation.org/supply-chains/overview?utm_source=chatgpt.com.

Elzinga, Remi; Reike, Denise; Negro, Simona O.; Boon, Wouter P.C. (2020): Consumer acceptance of circular business models. In: *Journal of Cleaner Production* 254, S. 119988. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.119988.

Engelbrecht, Adrian; Gerlach, Jin; Widjaja, Thomas (2016): Understanding the Anatomy of Data-Driven Business Models. Towards an Empirical Taxonomy. In: Proceedings of the 24th European Conference on Information Systems (ECIS). Istanbul, Türkei. Online verfügbar unter <https://core.ac.uk/download/pdf/301369681.pdf>.

Esser, Hartmut (1999): Soziologie. Spezielle Grundlagen. Frankfurt a.M., New York: Campus Verl. (1).

Europäisches Parlament (2023): Kreislaufwirtschaft: Definition und Vorteile. Online verfügbar unter <https://www.europarl.europa.eu/topics/de/article/20151201STO05603/kreislaufwirtschaft-definition-und-vorteile>, zuletzt aktualisiert am 01.06.2024, zuletzt geprüft am 10.05.2024.

European Commission (2024): The European Green Deal. Online verfügbar unter https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/story-von-der-leyen-commission/european-green-deal_en, zuletzt aktualisiert am 09.2024, zuletzt geprüft am 30.10.2025.

European Union (2023): VERORDNUNG (EU) 2023/1542 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES. Online verfügbar unter https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32023R1542&utm_source=chatgpt.com.

Evans, David S. (2009): How Catalysts Ignite: The Economics of Platform-Based Start-Ups.

Expertenkreis Transformation der Automobilindustrie (2025): Handlungsempfehlungen für die Entwicklung einer Kreislaufwirtschaft in der Automobilindustrie. Chancen und aktuelle Herausforderungen. Online verfügbar unter https://expertenkreis-automobilwirtschaft.de/media/pages/home/9b6072f31d-1738752139/expertenkreis-transformation-automobilwirtschaft_circular-car_final_250205.pdf.

Ferreira, Inês A.; Godina, Radu; Pinto, António; Pinto, Pedro; Carvalho, Helena (2023): Boosting additive circular economy ecosystems using blockchain: An exploratory case study. In: *Computers & Industrial Engineering* 175, S. 108916. DOI: 10.1016/j.cie.2022.108916.

Fetting, Corinna (2020): The European Green Deal. Hg. v. ESDN Office. Wien. Online verfügbar unter https://www.esdn.eu/fileadmin/ESDN_Reports/ESDN_Report_2_2020.pdf, zuletzt geprüft am 29.10.2025.

Ford Motor Company (2023): Ford commits to carbon neutrality by 2050. Online verfügbar unter <https://corporate.ford.com/articles/sustainability/ford-expands-climate-change-goals.html>.

Förderer, Jens (2021): Erfolgsmodell Digitale Plattformen: Schäffer-Poeschel.

Förtsch, Gabi; Meinholz, Heinz (2023): Handbuch Betriebliche Kreislaufwirtschaft. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Fuchs, Martina; Westermeyer, Johannes (2023): Automobilindustrie. In: Elmar Kulke (Hg.): Wirtschaftsgeographie Deutschlands. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 215–225.

Gall, Markus; Steinbichler, Georg; Lang, Reinhold W. (2021): Learnings about design from recycling by using post-consumer polypropylene as a core layer in a co-injection molded sandwich structure product. In: *Materials & Design* 202, S. 109576. DOI: 10.1016/j.matdes.2021.109576.

Gallie, W. B. (1955): Essentially Contested Concepts. In: *Proceedings of the Aristotelian Society* 56, S. 167–198. Online verfügbar unter <http://www.jstor.org/stable/4544562>.

Garza-Reyes, Jose Arturo; Salomé Valls, Ailin; Peter Nadeem, Simon; Anosike, Anthony; Kumar, Vikas (2019): A circularity measurement toolkit for manufacturing SMEs. In: *International Journal of Production Research* 57 (23), S. 7319–7343. DOI: 10.1080/00207543.2018.1559961.

Geissdoerfer, Martin; Savaget, Paulo; Bocken, Nancy M.P.; Hultink, Erik Jan (2017): The Circular Economy – A new sustainability paradigm? In: *Journal of Cleaner Production* 143, S. 757–768. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.12.048.

Geissdoerfer, Martin; Vladimirova, Doroteya; van Fossen, Kirsten; Evans, Steve (2018): Product, service, and business model innovation: A discussion. In: *Procedia Manufacturing* 21, S. 165–172. DOI: 10.1016/j.promfg.2018.02.107.

German Federal Government (2021): German Sustainable Development Strategy. Online verfügbar unter <https://www.bundesregierung.de/resource/blob/974430/1937922/29d69a8890ac45d1f4326bce2334b2ae/2021-06-29-dns-englisch-data.pdf>.

Gómez-Marin, Cristian Giovanni; Serna-Uran, Conrado Augusto; Arango-Serna, Martin Dario; Comi, Antonio (2020): Microsimulation-Based Collaboration Model for Urban Freight Transport. In: *IEEE Access* 8, S. 182853–182867. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3028564.

Gopalakrishnan, S.; Santoro, M. D. (2004): Distinguishing Between Knowledge Transfer and Technology Transfer Activities: The Role of Key Organizational Factors. In: *IEEE Trans. Eng. Manage.* 51 (1), S. 57–69. DOI: 10.1109/TEM.2003.822461.

Gregor, Shirley; Kruse, Leona; Seidel, Stefan (2020): Research Perspectives: The Anatomy of a Design Principle. In: *JAI/S* 21, S. 1622–1652. DOI: 10.17705/1jais.00649.

Grisold, Thomas; Groß, Steven; Stelzl, Katharina; vom Brocke, Jan; Mendling, Jan; Röglinger, Maximilian; Rosemann, Michael (2022): The Five Diamond Method for Explorative Business Process Management. In: *Bus Inf Syst Eng* 64 (2), S. 149–166. DOI: 10.1007/s12599-021-00703-1.

Gross, Steven; Stelzl, Katharina; Grisold, Thomas; Mendling, Jan; Röglinger, Maximilian; vom Brocke, Jan (2021): The Business Process Design Space for exploring process redesign alternatives. In: *BPMJ* 27 (8), S. 25–56. DOI: 10.1108/BPMJ-03-2020-0116.

Gruler, Aljoscha; Juan, Angel A.; Klüter, Astrid; Rabe, Markus (2017): A Simulation-Optimization Approach for the Two-Echelon Location Routing Problem Arising in the Creation of Urban Consolidation Centres. In: Sigrid Wenzel und Tim Peter (Hg.): *Simulation in Produktion und Logistik 2017*. Kassel: ASIM; Kassel University Press (ASIM-Mitteilung, Nr. AM 164), S. 129–138. Online verfügbar unter https://www.asim-gi.org/fileadmin/user_upload_asim/asim_publikationen_oa/am164_oa/am164_asim_spl_2017_kassel_proceedings_oa.pdf#page=142.

Guenoun, Rajae; Winkelmann, Stephanie; Möller, Frederik (2024): Data for Sustainable Development in Logistics and Supply Chains – A Systematic Literature Review. In: Tung Bui (Hg.): *Proceedings of the 57th Hawaii International Conference on System Sciences*. Hawaii International Conference on System Sciences: Hawaii International Conference on System Sciences (Proceedings of the Annual Hawaii International Conference on System Sciences).

Gutenschwager, Kai; Rabe, Markus; Spieckermann, Sven; Wenzel, Sigrid (2017): *Simulation in Produktion und Logistik. Grundlagen und Anwendungen*. Berlin: Springer Vieweg.

Hansen, M. T.; Nohria, N.; Tierney, T. J. (1999): What's Your Strategy for Managing Knowledge? In: *Harvard Business Review*, 1999. Online verfügbar unter <https://hbr.org/1999/03/whats-your-strategy-for-managing-knowledge>, zuletzt geprüft am 05.06.2026.

Hartmann, Philipp Max; Zaki, Mohamed; Feldmann, Niels; Neely, Andy (2016): Capturing Value from Big Data. A Taxonomy of Data-Driven Business Models Used by Start-Up Firms. In: *International Journal of Operations & Production Management* 36 (10), S. 1382–1406. DOI: 10.1108/IJOPM-02-2014-0098.

Helmold, Marc; Treu, Johannes; Fritz, Jürgen; Hummel, Florian (2024): *ESG, CSR und SDG als langfristiger Wettbewerbsvorteil*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.

Henry, Marvin; Bauwens, Thomas; Hekkert, Marko; Kirchherr, Julian (2020): A typology of circular start-ups: An Analysis of 128 circular business models. In: *Journal of Cleaner Production* 245, S. 118528. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.118528.

Hofmann, Martin; Neukart, Florian; Bäck, Thomas (2017): Artificial Intelligence and Data Science in the Automotive Industry. DOI: 10.48550/arXiv.1709.01989.

Hoppe, Christoph; Winkelmann, Stefanie; Schoormann, Thorsten; Möller, Frederik (2024): Get Ready for the Future. Capabilities for a Circular Economy in the Automotive Industry. In: *Proceedings of the 32 European Conference on Information Systems (ECIS)*. Paphos, Zypern.

Hoppe-Ludwig, Christoph; Schoormann, Thorsten; Möller, Frederik (2025): A capability map for implementing the circular economy in organizations. In: *J of Industrial Ecology*, Artikel jiec.70103. DOI: 10.1111/jiec.70103.

Hosseini Shekarabi, Seyed Ashkan; Kiani Mavi, Reza; Romero Macau, Flavio (2025): Supply Chain Resilience: A Critical Review of Risk Mitigation, Robust Optimisation, and Technological Solutions and Future Research Directions. In: *Glob J Flex Syst Manag* 26 (3), S. 681–735. DOI: 10.1007/s40171-025-00458-8.

Hunker, Joachim; Wuttke, Alexander; Scheidler, Anne Antonia; Rabe, Markus (2021): A Farming-for-Mining-Framework to Gain Knowledge in Supply Chains. In: S. Kim, B. Feng, K.

Smith, S. Masoud, Z. Zheng, C. Szabo und M. Loper (Hg.): Proceedings of the 2021 Winter Simulation Conference (WSC). Piscataway, New Jersey: IEEE.

International Data Spaces Association (2023): IDS Reference Architecture Model 4.0. Online verfügbar unter <https://docs.internationaldataspaces.org/knowledge-base/ids-ram-4.0>, zuletzt aktualisiert am 11.04.2023, zuletzt geprüft am 11.04.2023.

Isopp, Antonio; Philipp, Marlon; Weyer, Johannes; Zilt, Aaron (2024): Exploring Differing Perspectives on Sustainability and Corresponding Strategies in German Automotive Companies. In: *IJAT* 18 (6), S. 737–746. DOI: 10.20965/ijat.2024.p0737.

Jain, A. K.; Murty, M. N.; Flynn, P. J. (1999): Data clustering. In: *ACM Comput. Surv.* 31 (3), S. 264–323. DOI: 10.1145/331499.331504.

Juan, Angel A.; Faulin, Javier; Grasman, Scott E.; Rabe, Markus; Figueira, Gonçalo (2015): A review of simheuristics: Extending metaheuristics to deal with stochastic combinatorial optimization problems. In: *Operations Research Perspectives* 2, S. 62–72. DOI: 10.1016/j.orp.2015.03.001.

Kamińska-Witkowska, Aleksandra; Kaźmierczak, Magdalena (2024): Sustainability reporting in selected automotive companies. In: *Engineering Management in Production and Services* 16 (3), S. 129–142. DOI: 10.2478/emj-2024-0028.

Kannegiesser, Matthias; Günther, Hans-Otto; Gylfason, Ólafur (2014): Sustainable Development of Global Supply Chains - Part 2: Investigation of the European Automotive Industry. In: *Flexible Services and Manufacturing Journal* 26 (1-2), S. 48–68. DOI: 10.1007/s10696-013-9177-4.

Kaufmann, Traute (2021): PESTEL-Analyse. In: Traute Kaufmann (Hg.): *Strategiewerkzeuge aus der Praxis*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 19–28.

Kirchherr, Julian; Reike, Denise; Hekkert, Marko (2017): Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. In: *Resources, Conservation and Recycling* 127, S. 221–232. DOI: 10.1016/j.resconrec.2017.09.005.

Kleijnen, Jack P.C. (1995): Verification and Validation of Simulation Models. In: *European Journal of Operational Research* 82 (1), S. 145–162. DOI: 10.1016/0377-2217(94)00016-6.

Kraft, Michael Hans Gino; Christ, Oliver; Scherer, Lukas (2022): *Management der Kreislaufwirtschaft*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.

Kreutzer, Dennis; Müller-Abdelrazeq, Sarah Luisa; Isenhardt, Ingrid (2023): Circular Economy Maturity Models. A Systematic Literature Review. In: *International Journal of Economics and Management Engineering* (17), Artikel 10, S. 666–678.

Kuckartz, Udo (2012): *Qualitative Inhaltsanalyse. Methoden, Praxis, Computerunterstützung*. Weinheim, Basel: Beltz Juventa.

Kuhnt, S.; Wenzel, S. (2010): Information acquisition for modelling and simulation of logistics networks. In: *Journal of Simulation* 4 (2), S. 109–115. DOI: 10.1057/jos.2009.9.

Kumar, Anil (2015): Green Logistics for sustainable development: an analytical review. In: *IOSRD International Journal of Business* 1 (1). Online verfügbar unter https://www.researchgate.net/publication/330422673_Green_Logistics_for_sustainable_development_an_analytical_review.

Kumar, Vikas; Sezersan, Ihsan; Garza-Reyes, Jose Arturo; Gonzalez, Ernesto D.R.S.; AL-Shboul, Moh'd Anwer (2019): Circular economy in the manufacturing sector: benefits, opportunities and barriers. In: *MD* 57 (4), S. 1067–1086. DOI: 10.1108/MD-09-2018-1070.

Kundisch, Dennis; Muntermann, Jan; Oberländer, Anna Maria; Rau, Daniel; Röglinger, Maximilian; Schoormann, Thorsten; Szopinski, Daniel (2022): An Update for Taxonomy Designers. In: *Business & Information Systems Engineering* 64 (4), S. 421–439. DOI: 10.1007/s12599-021-00723-x.

Kunert, Julia; van der Valk, Hendrik; Scheerer, Hannah; Hoppe, Christoph (2024): Potentials and Barriers of the Metaverse for Circular Economy. In: 2024 Winter Simulation Conference (WSC). 2024 Winter Simulation Conference (WSC). Orlando, FL, USA, 15.12.2024 - 18.12.2024: IEEE, S. 3034–3045.

Kunert, Julia; Wuttke, Alexander; van der Valk, Hendrik (2025): Review of Digital Technologies for the Circular Economy and the Role of Simulation. In: 2025 Winter Simulation Conference (WSC). 2025 Winter Simulation Conference (WSC). Seattle, WA, USA, 07.12.2025 - 10.12.2025: IEEE, S. 3097–3108.

La Torre, Rocio de; Onggo, Bhakti S.; Corlu, Canan G.; Nogal, Maria; Juan, Angel A. (2021): The Role of Simulation and Serious Games in Teaching Concepts on Circular Economy and Sustainable Energy. In: *Energies* 14 (4), S. 1138. DOI: 10.3390/en14041138.

Lasch, Rainer (2023): Strategisches und operatives Logistikmanagement: Prozesse. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.

Law, Averill M. (2015): Simulation modeling and analysis. 5. Aufl. New York, NY: McGraw-Hill Education. Online verfügbar unter <http://ndl.ethernet.edu.et/bitstream/123456789/87806/5/simulation%20modeling%20and%20analysis%20by%20averill%20m%20law%20%28z-lib.org%29.pdf>.

Lehmacher, Wolfgang; Bödecker, Johann (2023): Circular Economy. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.

Leimeister, Jan Marco (2020): Service-Strategie. In: Jan Marco Leimeister (Hg.): Dienstleistungsengineering und -management. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 109–139.

Liu, Qinglan; Trevisan, Adriana Hofmann; Yang, Miying; Mascarenhas, Janaina (2022): A framework of digital technologies for the circular economy: Digital functions and mechanisms. In: *Bus Strat Env* 31 (5), S. 2171–2192. DOI: 10.1002/bse.3015.

Losa, Riccardo (2025): Public policies on circular economy: A systematic review. In: *Ecological Economics* 228, S. 108452. DOI: 10.1016/j.ecolecon.2024.108452.

Luckow, Andre; Eirich, Joscha; Demtröder, Kai (2023): Künstliche Intelligenz: Anwendungen und Werkzeuge in der Automobilindustrie. In: Andreas Gillhuber, Göran Kauermann und Wolfgang Hauner (Hg.): Künstliche Intelligenz und Data Science in Theorie und Praxis. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 141–155.

Luoma, Päivi; Toppinen, Anne; Penttinen, Esko (2021): Role and Value of Data in Circular Business Models. A Systematic Literature Review. In: *Journal of Business Models* 9 (2), S. 44–71. DOI: 10.5278/jbm.v9i2.3448.

Mares, Albert; Sabadka, Dusan; Molnar, Vierošlav; Fedorko, Gabriel (2023): Improving competitiveness of an assembly line by simulation based productivity increase – A case study. In: *JOC* 15 (3), S. 43–59. DOI: 10.7441/joc.2023.03.03.

März, Lothar; Weigert, Gerald (2011): Simulationsgestützte Optimierung. In: Lothar März, W. Krug, O. Rose und Gerald Weigert (Hg.): Simulation und Optimierung in Produktion und Logistik: Springer, Berlin, Heidelberg, S. 3–12. Online verfügbar unter https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-14536-0_1.

- Matsuda, Yuki; Tanaka, Kenji (2022): Sustainable Last Mile Delivery Service Design by Exploring Wider Solution Space in Half-Cooperative Customers. In: IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe. Prague, Czech Republic.
- Meesublak, Koonlachai; Klinsukont, Tosapol (2020): A Cyber-Physical System Approach for Predictive Maintenance. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Smart Internet of Things. IEEE International Conference on Smart Internet of Things (SmartIoT). Beijing, China, 14.08.2020 - 16.08.2020: IEEE, S. 337–341.
- Möller, Frederik; Stachon, Maleen; Azkan, Can; Schoormann, Thorsten; Otto, Boris (2022a): Designing Business Model Taxonomies – Synthesis and Guidance from Information Systems Research. In: *Electron Markets* 32 (2), S. 701–726. DOI: 10.1007/s12525-021-00507-x.
- Möller, Frederik; Stachon, Maleen; Jussen, Ilka; Schweihoff, Julia; van der Valk, Hendrik; Schmidt, Michael; Handrup, Stephanie (2022b): Towards a Taxonomy of API Services in Logistics. In: Proceedings of the 55th Hawaii International Conference on System Sciences. Maui, Hawaii, USA.
- Napoleone, Alessia; Macchi, Marco; Pozzetti, Alessandro (2020): A Review on the Characteristics of Cyber-Physical Systems for the Future Smart Factories. In: *Journal of Manufacturing Systems* 54, S. 305–335. DOI: 10.1016/j.jmsy.2020.01.007.
- Nickerson, Robert C.; Varshney, Upkar; Muntermann, Jan (2013): A Method for Taxonomy Development and its Application in Information Systems. In: *European Journal of Information Systems* 22 (3), S. 336–359. DOI: 10.1057/ejis.2012.26.
- Oks, Sascha Julian; Fritzsche, Albrecht; Möslin, Kathrin M. (2017): An Application Map for Industrial Cyber-Physical Systems. In: *Industrial Internet of Things*, S. 21–46. DOI: 10.1007/978-3-319-42559-7_2.
- Oks, Sascha Julian; Fritzsche, Albrecht; Möslin, Kathrin M. (2018): Engineering industrial cyber-physical systems: An application map based method. In: *Procedia CIRP* 72, S. 456–461. DOI: 10.1016/j.procir.2018.03.126.
- Osann, Isabell; Mattheis, Henrike; Mayer, Ida; Götzenbrugger, René (2021): Workbook Kreislaufwirtschaft. München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG.
- Osterwalder, Alexander; Pigneur, Yves (2010): Business Model Generation. A Handbook for Visionaries, Game Changer, and Challengers. New Jersey, America: John Wiley & Sons.
- Otto, Boris (2021): GAIA-X and IDS. Hg. v. International Data Spaces Association.
- Otto, Boris (2022): Designing Data Spaces. The Ecosystem Approach to Competitive Advantage. Unter Mitarbeit von Michael ten Hompel und Stefan Wrobel. 1st ed. 2022. Cham: Springer International Publishing; Springer. Online verfügbar unter <https://ebookcentral.proquest.com/lib/kxp/detail.action?docID=6978268>.
- Paré, Guy; Tate, Mary; Johnstone, David; Kitsiou, Spyros (2016): Contextualizing the twin concepts of systematicity and transparency in information systems literature reviews. In: *European Journal of Information Systems* 25 (6), S. 493–508. DOI: 10.1057/s41303-016-0020-3.
- Parker, Geoffrey; van Alstyne, Marshall; Choudary, Sangeet Paul; mitp Verlags GmbH & Co. KG (2017): Die Plattform-Revolution. von Airbnb, Uber, PayPal und Co. lernen: wie neue Plattform-Geschäftsmodelle die Wirtschaft verändern : Methoden und Strategien für Unternehmen und Start-ups. 1. Aufl.: Frechen : mitp Verlags GmbH & Co. KG.

Peffers, Ken; Tuunanen, Tuure; Rothenberger, Marcus A.; Chatterjee, Samir (2007): A Design Science Research Methodology for Information Systems Research. In: *Journal of Management Information Systems* 24 (3), S. 45–77. DOI: 10.2753/MIS0742-1222240302.

Plotnikov, Max; Schreynemackers, Pia; Joachimsthaler, Charlotte; Jarmer, Jan-Philipp; Kuhlmann, Gerd; Karlstedt, Florian et al. (2023): Batterie-Logistik. Whitepaper. Fraunhofer-Gesellschaft. Dortmund, Deutschland.

Potting, J.; Hekkert, M.; Worrell, E.; Hanemaaijer, A. (2017a): Circular Economy: Measuring Innovation in the Product Chain. Online verfügbar unter <https://www.semanticscholar.org/paper/Circular-Economy%3A-Measuring-Innovation-in-the-Chain-Potting-Hekkert/139c4590e78f66857304dd13765f640313d34921>.

Potting, José; Hekkert, M. P.; Worrell, Ernst; Hanemaaijer, Aldert (2017b): Circular Economy: Measuring Innovation in Product Chain. Hg. v. PBL Netherlands Environmental Assessment Agency. The Hague.

Qin, Rui; Ding, Wenwen; Li, Juanjuan; Guan, Sangtian; Wang, Ge; Ren, Yuhai; Qu, Zhiyou (2023): Web3-Based Decentralized Autonomous Organizations and Operations: Architectures, Models, and Mechanisms. In: *IEEE Trans. Syst. Man Cybern, Syst.* 53 (4), S. 2073–2082. DOI: 10.1109/TSMC.2022.3228530.

Rabe, Markus; Goldsman, David (2019): Decision Making Using Simulation Methods in Sustainable Transportation. In: Javier Faulin, Scott E. Grasman, Angel A. Juan und P. Hirsch (Hg.): *Sustainable Transportation and Smart Logistics. Decision-making Models and Solutions*. Amsterdam: Elsevier, S. 305–333.

Rabe, Markus; Klueter, Astrid; Raps, Johannes (2020): Evaluating different distance metrics for calculating distances of last mile deliveries in urban areas for integration into supply chain simulation. In: *Journal of Simulation* 14 (1), S. 41–52. DOI: 10.1080/17477778.2019.1664262.

Rabe, Markus; Spieckermann, Sven; Wenzel, Sigrid (2008): Verifikation und Validierung für die Simulation in Produktion und Logistik. Vorgehensmodelle und Techniken. Berlin: Springer (VDI-Buch).

Rade, Andreas (2024): Kreislaufwirtschaft: Umwelt, Klima und Wirtschaft zusammendenken. So bleibt die deutsche Automobilindustrie weltweit führend. Verband der Automobilindustrie e.V. Tagesspiegel Background. Online verfügbar unter https://www.vda.de/de/aktuelles/artikel/2024/gastbeitrag-kreislaufwirtschaft?utm_source=chatgpt.com, zuletzt aktualisiert am 29.07.2024, zuletzt geprüft am 30.10.2025.

Rauter, Romana (2013): Interorganisationaler Wissenstransfer. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.

Rizos, Vasileios; Urban, Patricia (2024): Implementing the EU Digital Battery Passport: Opportunities and Challenges for Battery Circularity. Online verfügbar unter https://www.researchgate.net/publication/378796454_Implementing_the_EU_Digital_Battery_Passport_Opportunities_and_Challenges_for_Battery_Circularity, zuletzt geprüft am 18.08.26.

Rodrigue, Jean-Paul; Slack, Brian; Comtois, Claude (2008): Green Logistics. In: Ann M. Brewer, Kenneth J. Button und David A. Hensher (Hg.): *Handbook of Logistics and Supply-Chain Management*: Emerald Group Publishing Limited, S. 339–350.

Rodriguez, Moises; Piattini, Mario; Ebert, Christof (2019): Software Verification and Validation Technologies and Tools. In: *IEEE Software* 36 (2), S. 13–24. DOI: 10.1109/MS.2018.2883354.

- Rojahn, Marcel; Gronau, Norbert (2024): Openness indicators for the evaluation of digital platforms between the launch and maturity phase. In: Proceedings of the 57th Annual Hawaii International Conference on System Sciences: Department of IT Management Shidler College of Business University of Hawaii, S. 4516–4525. Online verfügbar unter <https://publishup.uni-potsdam.de/frontdoor/index/index/year/2024/docId/63087>.
- Rosemann, Michael (2020): Explorative Process Design Patterns. In: Dirk Fahland, Chiara Ghidini, Jörg Becker und Marlon Dumas (Hg.): Business Process Management, Bd. 12168. Cham: Springer International Publishing (Lecture Notes in Computer Science), S. 349–367.
- Saari, Leila; Valkokari, Katri; Martins, Jorge Tiago; Acerbi, Federica (2024): Circular Economy Matrix Guiding Manufacturing Industry Companies towards Circularity—A Multiple Case Study Perspective. In: *Circ.Econ.Sust.* 4 (4), S. 2505–2530. DOI: 10.1007/s43615-024-00385-3.
- Sacco, Pasqualina; Vinante, Christian; Borgianni, Yuri; Orzes, Guido (2021): Circular Economy at the Firm Level: A New Tool for Assessing Maturity and Circularity. In: *Sustainability* 13 (9), S. 5288. DOI: 10.3390/su13095288.
- Salmi, Pekka; Torkkeli, Marko (2009): Success factors of interorganisational knowledge transfer: a case of a collaborative public private R&D project. In: *IJBIR* 3 (2), Artikel 22750, S. 109. DOI: 10.1504/IJBIR.2009.022750.
- Sankararaman, Shankar; Mahadevan, Sankaran (2015): Integration of Model Verification, Validation, and Calibration for Uncertainty Quantification in Engineering Systems. In: *Reliability Engineering & System Safety* 138, S. 194–209. DOI: 10.1016/j.ress.2015.01.023.
- Sargent, Robert G. (2015): Model Verification and Validation. In: Margaret L. Loper (Hg.): Modeling and Simulation in the Systems Engineering Life Cycle. Core Concepts and Accompanying Lectures. London: Springer (Simulation Foundations, Methods and Applications Ser), S. 57–65.
- Scheidler, Anne Antonia (2017): Methode zur Erschließung von Wissen aus Datenmustern in Supply-Chain-Datenbanken. Göttingen: Cuvillier Verlag (Schriftenreihe Fortschritte in der IT in Produktion und Logistik, v. 1).
- Scheidler, Anne Antonia; Rabe, Markus (2021): Integral verification and validation for knowledge discovery procedure models. In: *IJBIDM* 18 (1), Artikel 111744, S. 73–87. DOI: 10.1504/ijbidm.2021.111744.
- Schmelzer, Hermann J.; Sesselmann, Wolfgang (2020): Geschäftsprozessmanagement in der Praxis. Kunden zufriedenstellen, Produktivität steigern, Wert erhöhen. 9., vollständig überarbeitete Auflage. München: Hanser.
- Schrage, Tennessee; Dinter, Barbara (2025): Towards designing a Business Process Management System for the Circular Economy. In: Australasian Conference on Information Systems, ACIS 2025, Petrie, QLD, Australia, December 3-5, 2025. Online verfügbar unter <https://aisel.aisnet.org/acis2025/282>.
- Schrage, Tennessee; Dinter, Barbara (2026): A Taxonomy for Redesigning After-Sales with the Digital Twin from an Explorative Business Process Management Perspective. In: Paulo Da Rupino Cunha und Marinos Themistocleous (Hg.): Information Systems, Bd. 573. Cham: Springer Nature Switzerland (Lecture Notes in Business Information Processing, 573), S. 174–188.
- Schütte, Jens; Dickel, Jonas (2023): Nachhaltigkeitsberichterstattung in kleinen und mittelständischen Unternehmen. In: Joachim Weber (Hg.): Tagungsband zum Forschungstag 2023 "Nachhaltigkeit gestalten: Gesellschaft, Gesundheit, Technologien und Märkte". DHBW Stuttgart, 06.07.2023, S. 184–185.

- Sharma, Manu; Luthra, Sunil; Joshi, Sudhanshu; Kumar, Anil; Jain, Akshat (2023): Green Logistics Driven Circular Practices Adoption in Industry 4.0 Era: A Moderating Effect of Institution Pressure and Supply Chain Flexibility. In: *Journal of Cleaner Production* 383, S. 135284. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.135284.
- Sonar, Harshad; Dey Sarkar, Bishal; Joshi, Prasad; Ghag, Nikhil; Choubey, Vardhan; Jagtap, Sandeep (2024): Navigating barriers to reverse logistics adoption in circular economy: An integrated approach for sustainable development. In: *Cleaner Logistics and Supply Chain* 12, S. 100165. DOI: 10.1016/j.clscn.2024.100165.
- Sterck, Felix; Peukert, Christian; Hunke, Fabian; Weinhardt, Christof (2022): Understanding Car Data Monetization: A Taxonomy of Data-Driven Business Models in the Connected Car Domain. In: *Wirtschaftsinformatik 2022 Proceedings*. Online verfügbar unter https://aisel.aisnet.org/wi2022/digital_business_models/digital_business_models/7.
- Szopinski, Daniel; Schoormann, Thorsten; Kundisch, Dennis (2019): Because your Taxonomy Is Worth It: Towards a Framework For Taxonomy Evaluation. In: *Proceedings of the 27th European Conference on Information Systems*. Stockholm & Uppsala, Schweden. Online verfügbar unter <https://aisel.aisnet.org/ecis2019/>.
- Szulanski, Gabriel (2000): The Process of Knowledge Transfer: A Diachronic Analysis of Stickiness. In: *Organizational Behavior and Human Decision Processes* 82 (1), S. 9–27. DOI: 10.1006/obhd.2000.2884.
- Tang, Song; Wang, Zhiqiang; Ge, Suli; Ma, Yandong; Tan, GaiFang (2022): Research and implementation of resource recovery supply chain financial platform based on blockchain technology. In: *International Conference on Computer Engineering and Artificial Intelligence*. Shijiazhuang, China.
- Teece, David J. (2010): Business Models, Business Strategy and Innovation. In: *Long Range Planning* 43 (2-3), S. 172–194. DOI: 10.1016/j.lrp.2009.07.003.
- Teece, David J. (2020): Hand in Glove: Open Innovation and the Dynamic Capabilities Framework. In: *Strategic Management Review* 1 (2), S. 233–253. DOI: 10.1561/111.00000010.
- Teichert, Leonhard; Ivanova, Polina; Remy, Merle; Thiel, Leon Henrik; Garcíá Schmidt, Armando; Kadner, Susanne (2025): The Circular Economy braucht Leadership. Die entscheidende Rolle interner Champions für den Wandel zum zirkulären Unternehmen. Hg. v. UnternehmerTUM und Bertelsmann Stiftung. Online verfügbar unter <https://www.bertelsmann-stiftung.de/de/publikationen/publikation/did/circular-economy-braucht-leadership>, zuletzt geprüft am 30.10.2025.
- Tellioglu, Hilda: Collaboration life cycle. In: *2008 International Symposium on Collaborative Technologies and Systems*, S. 357–366.
- Thiel, Michael (2002): Wissenstransfer in komplexen Organisationen. Wiesbaden: Deutscher Universitätsverlag.
- Tiedemann, Jurek; Kunath, Gero (2024): Fachkräftereport September 2024. Unruhige Zeiten in der Automobilindustrie. Hg. v. Kofa. IW Köln. Online verfügbar unter https://www.iwkoeln.de/fileadmin/user_upload/Studien/KOFA_kompakt_und_Studien/2024/KOFA_Kompakt_9-2024_Fachkr%C3%A4fterreport_Q3.pdf, zuletzt geprüft am 29.10.2025.
- Tkaczyk, Marta; Salina, Anna; Lyly-Yrjänäinen, Jouni; Laine, Teemu (2025): Towards a digital twin of a service: a case of communicating cost and control implications of a new after-sales service with an animation. In: *Qualitative Research in Accounting & Management* 22 (3), S. 230–255. DOI: 10.1108/QRAM-10-2022-0175.

Tornatzky, L. G.; Fleischer, M. (1990): The Processes of Technological Innovation.: Lexington Books.

Ulrich, Patrick; Metzger, Jasmina (2022): Sustainability reporting: The way to standardized reporting according to the Corporate Sustainability Reporting Directive in Germany. In: Guido Max Mantovani, Alexander Kostyuk und Dmytro Govorun (Hg.): Proceedings of the International Online Conference "Corporate Governance: Theory and Practice". Corporate Governance: Theory and Practice, May 26., Ukraine: VIRTUS INTERPRESS, S. 81–87.

Umweltbundesamt (o. J.): CSR-Richtlinie. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/umweltberichterstattung-csr-richtlinie>, zuletzt geprüft am 19.05.2025.

UNFCCC: The Paris Agreement 2015. Online verfügbar unter <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement>.

United Nations (2015a): Transforming our world: The 2030 agenda for sustainable development. Online verfügbar unter <https://sdgs.un.org/2030agenda>, zuletzt geprüft am 02.02.2023.

United Nations (2015b): Transforming Our World: The 2030 Agenda for Sustainable Development. Online verfügbar unter <https://sdgs.un.org/>.

Upadhyay, Arvind; Balodi, Krishna Chandra; Naz, Farheen; Di Nardo, Mario; Jraisat, Luai (2023): Implementing industry 4.0 in the manufacturing sector: Circular economy as a societal solution. In: *Computers & Industrial Engineering* 177, S. 109072. DOI: 10.1016/j.cie.2023.109072.

van der Valk, Hendrik; Haße, Hendrik; Möller, Frederik; Otto, Boris (2022): Archetypes of Digital Twins. In: *Bus. Inf. Syst. Eng.* 64 (3), S. 375–391. DOI: 10.1007/s12599-021-00727-7.

van der Valk, Hendrik; Hunker, Joachim; Rabe, Markus; Otto, Boris (2020): Digital Twins in Simulative Applications: A Taxonomy. In: K.-H. Bae, B. Feng, S. Kim, S. Lazarova-Molnar, Z. Zheng, T. Roeder und R. Thiesing (Hg.): Proceedings of the 2020 Winter Simulation Conference (WSC). 2020 Winter Simulation Conference (WSC). Orlando, FL, USA, 12/14/2020 - 12/18/2020. Picaraway, New Jersey: IEEE Press, S. 2695–2706.

VDI Richtlinie 3633 - 1 (2014): Simulation von Logistik-, Materialfluss und Produktionssystemen. Grundlagen. Berlin: Beuth Verlag GmbH.

VDI Richtlinie 3633 - 3 (1997): Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen. Experimentplanung und -auswertung. Berlin: Beuth Verlag GmbH.

Verband der Automobilindustrie e.V. (2023): Zukunft der automobilen Kreislaufwirtschaft: Klimaneutrale Mobilität bis spätestens 2050. Online verfügbar unter <https://www.vda.de/de/aktuelles/publikationen/publication/-zukunft-der-automobilen--kreislaufwirtschaft>, zuletzt geprüft am 29.10.2025.

vom Brocke, Jan; Hevner, Alan; Maedche, Alexander (2020): Introduction to Design Science Research. In: Jan vom Brocke, Alan R. Hevner und Alexander Mädche (Hg.): Design Science Research. Cases. Cham: Springer International Publishing (Progress in IS), S. 1–13.

vom Brocke, Jan; Seidel, Stefan; Recker, Jan (Hg.) (2012): Green Business Process Management. Berlin, Heidelberg.

vom Brocke, Jan; Simons, Alexander; Niehaves, Björn; Riemer, Kai; Plattfaut, Ralf; Cleven, Anne (2009): Reconstructing the giant: On the importance of rigour in documenting the literature search process. In: European Conference on Information Systems. Online verfügbar unter <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:14940831>.

Walzberg, Julien; Frayret, Jean-Marc; Eberle, Annika L.; Carpenter, Alberta; Heath, Garvin (2023): Agent-based modeling and simulation for the circular economy: Lessons learned and path forward. In: *J of Industrial Ecology* 27 (5), S. 1227–1238. DOI: 10.1111/jiec.13423.

Wang, Shuai; Ding, Wenwen; Li, Juanjuan; Yuan, Yong; Ouyang, Liwei; Wang, Fei-Yue (2019): Decentralized Autonomous Organizations: Concept, Model, and Applications. In: *IEEE Trans. Comput. Soc. Syst.* 6 (5), S. 870–878. DOI: 10.1109/TCSS.2019.2938190.

Weber, P.; Keller, A.; Steinhäuser, N.; Hornberger, L.: Gewerkeübergreifende Zusammenarbeit – Beispiel für ein Wertschöpfungsnetzwerk im Handwerk. In: *Wissenschaft trifft Praxis*, Bd. 12, S. 19–24.

Webster, Jane; Watson, Richard T. (2002a): Analyzing the Past to Prepare for the Future: Writing a Literature Review. In: *MIS Quarterly* 26 (2), S. xiii–xxiii.

Webster, Jane; Watson, Richard T. (2002b): Analyzing the Past to Prepare for the Future: Writing a Literature Review. In: *MIS Quarterly* 26 (2), S. xiii–xxiii. DOI: 10.2307/4132319.

Weyer, Johannes (2008): *Techniksoziologie. Genese, Gestaltung und Steuerung sozio-technischer Systeme*. Weinheim, München: Juventa-Verlag (Grundlagentexte Soziologie).

Whelan, Robert (2010): Ecological system meets ‘digital ecosystem’. In: 4th IEEE International Conference on Digital Ecosystems and Technologies. 2010 4th IEEE International Conference on Digital Ecosystems and Technologies (DEST). Dubai, United Arab Emirates, 13.04.2010 - 16.04.2010: IEEE, S. 103–106.

Yachen Tang; Tingting Liu; Junjie Shiy; Haiyun Han; Guangyi Liu; Renchang Dai; Zhiwei, Wang (2020): Ontology based Knowledge Modeling and Extraction of Power Equipment Supply Chain. In: *Proceedings of the 12th IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference*. Nanjing, China.

Yang, Jing; Wang, Xiaoxing; Zhao, Yandong (2022): Parallel Manufacturing for Industrial Metaverses: A New Paradigm in Smart Manufacturing. In: *IEEE/CAA J. Autom. Sinica* 9 (12), S. 2063–2070. DOI: 10.1109/JAS.2022.106097.

Zeiss, Roman; Ixmeier, Anne; Recker, Jan; Kranz, Johann (2021): Mobilising information systems scholarship for a circular economy: Review, synthesis, and directions for future research. In: *Information Systems Journal* 31 (1), S. 148–183. DOI: 10.1111/isj.12305.

Ziegler, David; Abdelkafi, Nizar (2023): Exploring the Automotive Transition: A Technological and Business Model Perspective. In: *Journal of Cleaner Production* 421, S. 138562. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.138562.